

1998 VALE 0008

Numéro d'Ordre : 98-09

THESE

présentée à

l'Université de Valenciennes
et du Hainaut-Cambrésis

pour l'obtention du

DOCTORAT

Spécialité

Automatique des Systèmes Industriels et Humains

par

Marie-Pierre Lemoine Pacaux

Maître ès Sciences

Coopération Hommes-Machines dans les procédés complexes :

modèles techniques et cognitifs pour le Contrôle de Trafic Aérien

Soutenue le 2 Juillet 1998 devant la commission d'examen :

Mme	Sylviane	Gentil	Rapporteur
MM:	Bernard	Dubuisson	Rapporteur
	Jean-Claude	Angue	Examineur
	Serge	Debernard	Examineur
	Patrick	Millot	Co-directeur
	Jean-Michel	Hoc	Co-directeur
	Yves	Sagnier	Invité

Numéro d'Ordre : 98-09

THESE

présentée à

l'Université de Valenciennes
et du Hainaut-Cambrésis

pour l'obtention du

DOCTORAT

Spécialité
Automatique des Systèmes Industriels et Humains

par

Marie-Pierre Lemoine Pacaux

Maître ès Sciences

<p>Coopération Hommes-Machines dans les procédés complexes : modèles techniques et cognitifs pour le Contrôle de Trafic Aérien</p>
--

Soutenue le 2 Juillet 1998 devant la commission d'examen :

Mme	Sylviane	Gentil	Rapporteur
MM:	Bernard	Dubuisson	Rapporteur
	Jean-Claude	Angue	Examineur
	Serge	Debernard	Examineur
	Patrick	Millot	Co-directeur
	Jean-Michel	Hoc	Co-directeur
	Yves	Sagnier	Invité

*A la mémoire de ma mère,
A mon père,*
A ces parents formidables qui, par leurs
conseils, m'ont permis de suivre les
routes que je me traçais.

A Patrick,
Source de dynamisme, mais aussi de
patience, un ami omniprésent, sans qui
ce long chemin sinueux qu'est la thèse
aurait été bien difficile à parcourir.

Au petit Pacaux,
qui depuis l'intérieur de mon corps, m'a
soutenu dans le franchissement des
derniers obstacles.

Avant-propos

Le travail présenté dans ce mémoire a été réalisé au Laboratoire d'Automatique et de Mécanique Industrielles et Humaines (LAMIH) de l'Université de Valenciennes et du Hainaut-Cambrésis, au sein de l'équipe Informatique Industrielle et Communication Homme-Machine dirigée par le Professeur Patrick Millot. Je tiens ici à lui témoigner toute ma reconnaissance pour la confiance et les moyens qu'il m'a accordés au cours de ce long travail.

Je remercie également Sylviane Gentil, Professeur à l'École Nationale Supérieure d'Ingénieurs Électriciens et Directeur de recherche au Laboratoire d'Automatique de Grenoble, et Bernard Dubuisson, Professeur à l'Université de Technologie de Compiègne, Directeur-Adjoint du département Sciences Pour l'Ingénieur au Centre National de Recherche Scientifique (CNRS), Directeur de Recherche à HEUDIASYC, de me faire l'honneur d'être rapporteurs de ce travail.

J'adresse tout particulièrement mes remerciements à Jean-Michel Hoc, Directeur de Recherche au CNRS, Directeur Scientifique de PERCOTEC-LAMIH, et à Serge Debernard, Maître de Conférence à l'Université de Valenciennes, qui ont suivi mon travail et m'ont guidé durant la préparation de ce doctorat.

Mes remerciements s'adressent également à Jean-Claude Angue, Professeur à l'Université de Valenciennes, Président de l'Université de Valenciennes, Directeur de Recherche au LAMIH, pour avoir accepté d'examiner ce travail et de siéger à la commission d'examen.

Ce travail a été réalisé dans le cadre d'une convention de recherche avec le Centre d'Étude de la Navigation Aérienne (CENA). Je remercie Yves Sagnier, Chef de Département, et Frédéric Chupeau, d'avoir soutenu ce travail durant les trois années de cette convention. Je tiens également à inclure dans mes remerciements la subdivision Étude du Centre Régional de la Navigation Aérienne (CRNA) Est de Reims et aux contrôleurs aériens qui ont participé aux expérimentations.

Enfin, je remercie tous mes collègues et amis pour leurs encouragements et les nombreuses discussions que nous avons pu avoir.

Sommaire

SOMMAIRE	1
INTRODUCTION GÉNÉRALE	8
CHAPITRE I : SUPERVISION ET CONTRÔLE DE PROCÉDÉS COMPLEXES	
1. Introduction	11
2. Les systèmes de contrôle et de supervision.....	11
2.1. Organisation générale.....	11
2.2. Activités humaines dans la supervision et le contrôle de procédés	13
2.2.1. Les problèmes auxquels sont confrontés les opérateurs humains.....	13
2.2.2. Modèles de résolution de problème par l'opérateur humain	16
2.2.3. Les erreurs humaines.....	19
2.3. Identification des besoins humains en supervision et en contrôle.	21
3. Coopération homme-machine	24
3.1. Généralité et concepts.....	24
3.2. Notions de savoir-faire et de savoir-coopérer.....	26
3.2.1. Le savoir-faire.....	26
3.2.2. Le savoir-coopérer.....	26
3.2.3. Restrictions imposées par la coopération homme-machine	28
3.3. Structures de la coopération.....	29
3.3.1. Structure verticale pour la coopération	30
3.3.2. Structure horizontale pour la coopération.....	30
3.3.2.1. Mode explicite	31
3.3.2.2. Mode implicite.....	31
4. Principes de la répartition dynamique de tâches.....	32
4.1. Structure de la répartition dynamique de tâches	32
4.1.1. Le répartiteur	32
4.1.2. L'allocateur	33
4.2. Synthèses des études sur la répartition dynamique de tâches	33
5. Conclusion	34

CHAPITRE II : COOPÉRATION HOMMES-MACHINES MULTINIVEAU : EXEMPLE DU CONTRÔLE DE TRAFIC AÉRIEN

1. Introduction	35
2. Le contrôle de trafic aérien.....	35
2.1. Le contrôle en route.....	36
2.2. Organisation du système de contrôle en route	38
2.3. Description d'une position de contrôle	38
2.4. Présentation détaillée des tâches de contrôle	41
3. SPECTRA V1.....	43
3.1. Présentation de l'outil d'assistance SAINTEX	44
3.1.1. L'outil d'assistance tactique SAINTEX.....	44
3.1.2. Le répartiteur	45
3.1.3. Prise en compte des caractéristiques humaines.....	45
3.2. Résultats.....	45
3.2.1. Protocole expérimental.....	45
3.2.2. Mesures objectives	46
3.2.3. Résultats des évaluations subjectives.....	46
3.3. Conclusion.....	46
4. Principes de la coopération multiniveau.....	47
4.1. Caractéristiques d'une organisation multiniveau	47
4.2. La structure et les acteurs de la répartition dynamique de tâches	49
4.2.1. Répartition dynamique de tâches interne.....	49
4.2.2. Répartition dynamique de tâches externe	50
4.2.3. Répartition dynamique de tâches mixte	50
4.3. Les mécanismes de la répartition dynamique de tâches.....	51
4.3.1. Répartition dynamique de tâches préemptive.....	51
4.3.2. Répartition dynamique de tâches anticipée.....	53
4.3.2.1. Définition et formalisation des tâches.....	53
4.3.2.2. Prédiction des surcharges de travail.....	54
5. Application de la nouvelle approche.....	57
5.1. Mise en place de la répartition dynamique de tâches.....	57
5.2. Assistance tactique	58
5.3. Assistance stratégique	58
5.4. Modes explicite et explicite assisté	60
6. Conclusion	61

CHAPITRE III : PROTOCOLES EXPÉRIMENTAUX ET PREMIÈRES ANALYSES

1. Introduction	62
2. Plate-forme expérimentale	62
2.1. Position de contrôle.....	62
2.1.1. Introduction.....	62
2.1.2. Vue radar.....	63
2.1.3. Vue strip.....	65
2.1.4. Interfaces de communication complémentaires	68
2.2. Les outils d'aide pour la répartition dynamique des tâches de contrôle.....	68
2.2.1. L'outil d'aide au niveau tactique, SAINTEX	68
2.2.2. L'outil d'aide au niveau stratégique, PLAF	69
2.2.2.1. Assistance à l'évaluation de la charge du contrôleur radar	69
2.2.2.2. Allocation initiale.....	71
2.3 Architecture et organisation logicielle de la plate-forme.	71
3. Protocoles expérimentaux	73
3.1. Situations expérimentales	73
3.1.1. Situation sans aide.....	73
3.1.2. Situation explicite.....	74
3.1.3. Situation explicite assistée	75
3.2. Plan d'expérience	75
3.2.1. Phase de familiarisation.....	75
3.2.2. Déroulement des évaluations	76
3.2.3. Élaboration des scénarios.....	76
3.3. Recueil de données.....	79
3.3.1. Données numériques	79
3.3.2. Questionnaires	79
3.3.3. Verbalisations	79
4. Analyse des données objectives et subjectives	79
4.1. Variables de performance	79
4.1.1. Performance globale.....	79
4.1.1.1. Calcul de la consommation en fonction des niveaux de vol :.....	80
4.1.1.2. Calcul du temps de transit :	80
4.1.2. Analyse des erreurs des contrôleurs.....	81
4.1.3. Analyse des commandes.....	82
4.2. Évaluations subjectives.....	83
4.2.1. Estimation de la charge de travail	83
4.2.2. Réponses à TLX (Task Load index).....	85
4.2.3. Réponses aux questionnaires.....	85
5. Conclusion	88

CHAPITRE IV : ÉVALUATION SUBJECTIVE DE L'ACTIVITÉ PAR LES VERBALISATIONS

1. Introduction	89
2. Contribution méthodologique	90
2.1. Impact d'une communication	90
2.2. Modèle d'activité cognitive.....	92
2.2.1. Modélisation du savoir-faire des contrôleurs aériens.....	92
2.2.1.1. Élaboration de l'information	93
2.2.1.2. Diagnostic.....	93
2.2.1.3. Prise de décision	94
2.2.2. Modélisation du savoir-coopérer des contrôleurs aériens.....	95
2.2.2.1. Fonctions de la coopération.....	97
2.2.2.2. Le contrôle de la coopération	98
2.2.2.3. Les moyens de la coopération	98
2.2.2.4. Les activités sous-jacentes	98
3. Application de la méthode	99
3.1. Principes du codage.....	99
3.2. Mise en œuvre du codage	101
3.2.1. Codage de l'élaboration de l'information	101
3.2.2. Codage du diagnostic	101
3.2.3. Codage de la prise de décision	102
3.2.4. Codage de la coopération	103
3.2.4.1. Coopération homme-homme.....	103
3.2.4.2. Coopération homme-machine.....	104
4. Résultats	105
4.1. Résultats sur la répartition globale des activités	105
4.1.1. Élaboration de l'information.....	106
4.1.1.1. Objets des prises d'information	106
4.1.1.2. Types d'information	106
4.1.1.3. Conditions des prises d'information.....	107
4.1.2. Prise de décision.....	108
4.1.2.1. Types d'intervention.....	108
4.1.2.2. Conditions des prises de décision.....	109
4.1.3. Coopération	110
4.1.3.1. La coopération homme-homme.....	110
4.1.3.2. La coopération homme-machine.....	113
4.1.4. Effet de la charge de travail.....	115
4.2. Discussion	116
4.2.1. Situations avec aides et situation sans aide	116
4.2.2. Répartition explicite assistée et répartition explicite.....	118
5. Conclusion	119

CHAPITRE V : CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

1. Introduction	121
2. Synthèse des résultats sur le savoir-faire et le savoir-coopérer.....	121
2.1. Modification du savoir-faire des agents	122
2.1.1. Accentuation mise sur la planification.....	122
2.1.2. Maintien des agents sur leur savoir-faire.....	122
2.2. Opérationnalisation du savoir-coopérer des agents.....	122
2.2.1. La mise en commun des informations et des intentions de chaque agent.....	122
2.2.2. La mise en œuvre du partage de tâches	123
3. Proposition de recherche sur la notion d'Espace de Travail Commun	124
3.1. La coopération multiniveau.	124
3.2. L'Espace de Travail Commun.	127
4. Application au Contrôle de Trafic Aérien	130
4.1. Contexte d'intégration de l'Espace de Travail Commun.....	130
4.1.1. Implication des pilotes dans les tâches de contrôle.	130
4.1.2. Représentation du trafic	131
4.1.3. Reconnaissance de comportement des contrôleurs	131
4.2. Spécification de AMANDA.	132
4.2.1. Objectifs de AMANDA	132
4.2.2. Délégation de tâches.....	134
4.2.3. Structure de AMANDA	135
4.3. Mise en œuvre du système d'aide.....	138
4.3.1. Prise de décision au sol	138
4.3.2. Prise de décision à bord.....	139
4.3.3. Plate-forme expérimentale	140
4.3.3.1. Réalisme des expérimentations	140
4.3.3.2. Interfaces.....	141
5. Conclusion	144
CONCLUSION	145
BIBLIOGRAPHIE	147
LISTE DES TABLEAUX ET FIGURES	152
ANNEXE 1 - QUESTIONNAIRES	155
ANNEXE 2 - TLX (TASK LOAD INDEX)	166

$$1 + 1 = 3$$

(du moins je l'espère de tout mon coeur)

Encyclopédie du Savoir Relatif et Absolu,
EDMOND WELLS

(Bernard Werber, La révolution des fourmies)

Introduction générale

Depuis plusieurs décennies, l'automatisation et l'informatisation ne cessent de se perfectionner et de s'implanter dans l'industrie et dans les transports, mais aussi dans d'autres secteurs d'activité comme la médecine. La mise en œuvre de ces nouvelles techniques permet la conception de procédés industriels de plus en plus complexes. Or, les systèmes de contrôle et de supervision ne permettent pas encore d'automatiser complètement la supervision des procédés. Pour des raisons de sécurité, la surveillance et la reprise en cas d'incidents de tels systèmes ne sont jamais totalement abandonnés aux systèmes automatiques de supervision. Ainsi, l'opérateur humain reste l'élément indispensable au bon fonctionnement de procédés complexes. Ses capacités d'adaptation aux situations imprévues lui permettent d'appréhender toute dégradation du procédé et de construire rapidement des stratégies de récupération. Toutefois, l'opérateur humain connaît des limites qui constituent aujourd'hui l'objet de recherche de nombreuses disciplines.

La conception des systèmes homme-machine est un point de rencontre pluridisciplinaire. Dans ce thème de recherche, l'Automatique s'attache à développer des outils d'assistance à la supervision et/ou au contrôle de procédés. Les Sciences Humaines, sur ce même domaine, cherchent à identifier les caractéristiques de l'opérateur humain, en apportant des modèles et des méthodologies. L'un des premiers résultats de cette recherche pluridisciplinaire est le constat d'une automatisation uniquement basée sur une faisabilité technique, et responsable d'une dégradation de la performance du système homme-machine. L'Automatique Humaine définit alors ses principes. Elle ne se base plus seulement sur l'adaptation de l'homme à la machine, mais développe des outils d'assistance qui soutiennent les tâches humaines tant pour mettre à profit les compétences et capacités de l'homme, que pour répondre à ses défaillances.

La coopération homme-machine prend alors toute son importance. Au-delà des recherches sur la communication, l'interaction, ou encore l'interface homme-machine, la coopération homme-machine tente de répondre tant aux exigences industrielles que humaines, pour optimiser le système homme-machine. La Répartition Dynamique de Tâches est une forme particulière de Coopération Homme-Machine. Elle a pour objectif l'optimisation du procédé par répartition de tâches entre l'opérateur humain et un système d'aide. Une approche consiste à réguler la charge de travail de l'opérateur humain en affectant certaines tâches à un calculateur (Millot, 88). Des résultats significatifs ont été obtenus, à savoir l'augmentation de la performance. Cette expérimentation a été reproduite en situation simulée proche du réel, pour le Contrôle de Trafic Aérien (Debernard, 93). Deux principaux résultats sont apparus. Lorsque l'opérateur humain décide l'affectation d'une résolution de problème, soit au système d'aide, soit à lui-même, alors la confiance s'installe chez l'opérateur, mais au détriment de la performance. Lorsque le système d'aide décide cette affectation, alors la performance s'améliore, notamment en raison de la baisse de la charge de travail de l'opérateur. Cependant, ce pilotage automatique de la répartition soulève le problème du manque de confiance de l'opérateur humain envers le système d'aide puisqu'il est dépendant des choix décisionnels du système. Ces travaux ont été poursuivis par Vanderhaegen (1993) qui propose d'étendre le principe de la répartition à plus d'agents répartis sur différents niveaux décisionnels. La coopération multiniveau étant ainsi définie, elle a été expérimentée sous plusieurs modes, sur le même domaine d'application (Crévits, 96).

Cette thèse s'inscrit dans la continuité de ces recherches. Des problèmes de structures coopératives sont apparus, quelques exemples ont été évalués, mais sans vraiment se positionner en terme de choix sur l'outil d'assistance, ni sur son intégration dans les plans de l'opérateur humain. Une synthèse des études sur la coopération est donc présentée. Elle conduit à définir deux notions qui sont à la base de notre réflexion, le savoir-faire et le savoir-coopérer. D'autre part, le domaine d'application d'une étude contraignant fortement des expérimentations, nous détaillons les éléments essentiels dont il faut tenir compte pour s'assurer de la validité écologique d'une recherche appliquée (au sens de Rasmussen, c'est-à-dire la conformité des situations simulées aux situations réelles). Il en est de même de la construction d'un plan expérimental. Les conditions nécessaires à cette construction sont expliquées et illustrées sur l'exemple du Contrôle de Trafic Aérien. Un troisième thème abordé dans cette thèse est l'aspect méthodologie d'évaluation de l'activité en général, de la coopération en particulier. Une méthode d'évaluation est présentée, elle est fondée sur l'analyse des verbalisations des opérateurs humains, corrélée aux tâches effectuées sur le procédé et aux événements de la situation. Cette thèse est donc fortement pluridisciplinaire entre automatique, informatique industrielle et automatique humaine d'une part, et psychologie cognitive et ergonomie d'autre part. Elle est de ce fait co-dirigée par P. Millot pour la partie Sciences Pour l'Ingénieur et J.M. Hoc pour la partie Sciences Cognitives.

Ces différents points sont détaillés au cours de cinq chapitres. A partir de la problématique de la supervision et du contrôle de procédés complexes, nous abordons le thème de la coopération homme-machine pour soulever les lacunes, en particulier pour la répartition dynamique de tâches. Une structure coopérative étant définie, elle est appliquée et évaluée. L'analyse des résultats nous conduit à développer une nouvelle méthode d'évaluation de l'activité. Les résultats issus de cette méthode nous amènent à tirer des conclusions sur l'organisation du contrôle de trafic aérien, mais aussi sur les outils d'assistance qui sont mis à disposition aux différents niveaux hiérarchiques ou fonctionnels de cette organisation.

Ce travail a été réalisé dans le cadre d'une convention de recherche entre le Laboratoire d'Automatique et de Mécanique Industrielles et Humaines (LAMIH, URA CNRS 1775) et le Centre d'Étude de la Navigation Aérienne d'Athis-Mons (CENA). Notre recherche s'inscrit dans un projet de grande envergure du CENA qui tente de répondre à l'augmentation du trafic par la construction d'une nouvelle position de contrôle. Celle-ci se compose d'un ensemble de nouvelles techniques de communication et de positionnement radar, et participe à une nouvelle conception du système de contrôle qui cherche à intégrer tous les acteurs de la navigation aérienne.

Le mémoire comporte cinq chapitre. Le premier chapitre parcourt l'ensemble des travaux sur la supervision et le contrôle de procédés complexes. Nous présentons les recherches menées en Automatique et montrons que le maintien de l'opérateur humain dans la boucle de contrôle et de supervision impose d'orienter la recherche de façon à intégrer les caractéristiques humaines dans le développement des outils d'assistance. A partir des modèles de l'opérateur humain proposés par les Sciences Cognitives, nous identifions et présentons les besoins des opérateurs en supervision et contrôle de procédé. De ces besoins, nous donnons ensuite une synthèse de la littérature sur la coopération, et proposons une définition en fonction du savoir-faire, et du savoir-coopérer. Ces notions sont ensuite exprimées au travers de la présentation de la Répartition Dynamique de Tâches.

Les problèmes soulevés par les études antérieures sur la Répartition Dynamique de Tâches et les éléments de réponses apportés par les Sciences Cognitives, conduisent, au cours du deuxième chapitre, à présenter une étude complète de la Répartition Dynamique de Tâches appliquée au Contrôle de Trafic Aérien. Une description détaillée du domaine d'application est suivie de la présentation des résultats d'expérimentations. Les avantages et inconvénients des modes de répartition expérimentés par cette application, sont à l'origine de la définition de la coopération multiniveau. La Répartition Dynamique de Tâches Multiniveau est donc détaillée dans une dernière partie.

Le troisième chapitre présente les expérimentations de la Répartition Dynamique de Tâches Multiniveau appliquée au Contrôle de Trafic Aérien. Une première partie décrit la plate-forme expérimentale, c'est-à-dire les interfaces et les outils d'assistance. Puis les protocoles expérimentaux sont présentés. Enfin, les résultats issus des analyses de performances et des réponses aux questionnaires sont exposés. Cependant, ils soulignent l'absence de résultats précis sur la coopération homme-machine, notamment sur les modifications introduites par les outils d'assistance sur l'activité des opérateurs.

Le quatrième chapitre s'attache donc à présenter une méthodologie qui analyse finement l'activité développée par les opérateurs humains, notamment les interactions homme-machine. La première partie consiste à donner une description détaillée de la méthode d'évaluation, notamment son adéquation au domaine d'application. Puis les résultats issus de son exploitation sont présentés. Ils concernent plusieurs aspects de l'activité, l'élaboration de l'information, la prise de décision, la coopération et enfin les effets de la charge de travail. Ce chapitre se termine par une discussion qui nous conduit à reconsidérer les principes de la répartition dynamique de tâches.

Le cinquième et dernier chapitre reprend et généralise les résultats des expérimentations, puis propose une structure multiniveau étendue, dont la coopération est permise et facilitée par la construction d'un espace de travail commun à l'ensemble des agents impliqués. Ce chapitre précise donc les caractéristiques de cet espace de travail, notamment en terme de contenu et de communication. Puis, il est conclut par la spécification de cette structure dans le cadre du Contrôle de Trafic Aérien qui intègre cette fois, en plus des contrôleurs aériens, les pilotes des avions.

Chapitre I

Supervision et contrôle de procédés complexes

1. Introduction

Ce premier chapitre a pour objectif de présenter les systèmes homme-machine, de détailler les compétences et les capacités des opérateurs humains et des automatismes de façon à les mettre en adéquation.

La première partie rappelle les objectifs et fonctions des systèmes d'aide à la supervision, et démontre que leur intégration dans des procédés complexes implique le maintien de l'homme dans la boucle de contrôle et de supervision. De ce constat, un paragraphe s'applique à décrire les caractéristiques de l'opérateur humain en supervision et contrôle de procédé, notamment ses modèles de résolution de problème. De ces caractéristiques sont ensuite déduits les besoins humains.

La deuxième partie parcourt l'ensemble des recherches se rapportant à la coopération, élément essentiel pour la construction d'outils d'assistance. De nombreuses disciplines étudient le thème de la coopération, mais il est difficile de trouver le dénominateur commun qui permettrait de donner une définition générale. Cette partie tente d'y répondre par l'introduction de deux notions, le savoir-faire et le savoir-coopérer.

La troisième et dernière partie de ce chapitre présente les principes d'un type de coopération, "la Répartition Dynamique de Tâches", en distinguant ses différentes formes, en fonction du savoir-faire et du savoir-coopérer.

2. Les systèmes de contrôle et de supervision

2.1. Organisation générale

La conception d'un système automatisé s'élabore autour de quatre modules principaux prenant en charge différentes parties essentielles de l'automatisation, l'analyse, la modélisation, la simulation et la commande du système (Dubois, 94).

L'implantation du système automatisé s'organise autour de deux modules, *un module de contrôle/commande du procédé* et *un module de supervision*. Le module de contrôle/commande du procédé comprend l'acquisition et le traitement des signaux physiques du procédé et la commande temps réel. Le module de supervision comprend le stockage et la visualisation des éléments d'évaluation et de contrôle de l'état du procédé à partir de ses valeurs instantanées et historiques, ainsi que la surveillance et la détection des dysfonctionnements.

Le perfectionnement de ces modules doit mener à un contrôle automatique complet. Cependant, l'incapacité actuelle des automatismes à piloter des procédés réels dans tous leurs modes de fonctionnement, en particulier anormaux, impose la présence humaine. Le système automatisé ne

peut donc être considéré comme un système indépendant, mais comme une composante du système homme-machine. Donc le degré d'automatisation est variable depuis le contrôle totalement manuel jusqu'au contrôle entièrement automatique (cf. figure I-1, Sheridan, 84).

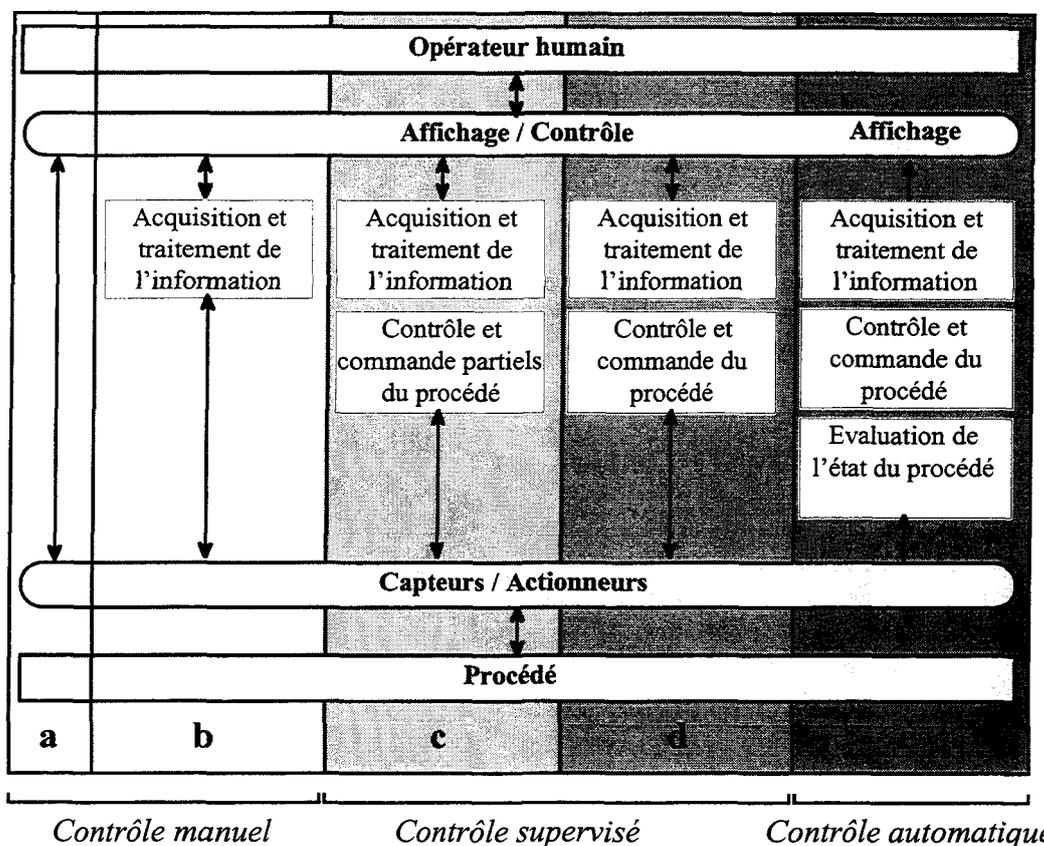


Figure I-1 : Les degrés d'automatisation dans les systèmes de contrôle et de supervision, adaptée de (Sheridan, 84).

L'intégration et la structure du système automatisé définit le degré d'automatisation du système homme-machine. Le contrôle est entièrement manuel (a) lorsque l'opérateur ne dispose d'aucune assistance à la prise de décision. Dans l'organisation (b) le contrôle reste manuel, mais l'acquisition et le traitement des signaux du procédé sont assistés. Ce type d'assistance consiste principalement en une acquisition et une mise en forme des informations issues des capteurs pour la surveillance du procédé. Les organisations (c) et (d) comprennent des systèmes de traitement plus perfectionnés puisqu'ils se composent, en plus du module d'acquisition/traitement de l'information, des modules de contrôle/commande du procédé. La différence porte sur le pilotage automatique des fonctions de contrôle/commande qui est partiel (c) ou complet (d). Dans ces deux cas, l'opérateur humain a un rôle de superviseur, et les tâches sont réparties entre l'opérateur et l'automatisme en fonction de leurs capacités et compétences respectives. La dernière structure (e) dispose, en plus des modules d'acquisition/traitement de l'information, et de contrôle/commande du procédé, d'un module de décision des actions à entreprendre. La seule tâche laissée à l'opérateur est la surveillance du procédé, mais sans possibilité d'action.

Généralement, le choix du degré d'automatisation lors de la conception d'un système homme-machine est effectué en fonction des possibilités d'automatisation des différents modules, sans réellement tenir compte des limites et des capacités respectives de l'opérateur humain et des automatismes. Or, même si les calculateurs et les automatismes sont précis et rapides dans les tâches de calcul, et qu'ils peuvent par conséquent remplacer l'homme dans certaines tâches difficiles et/ou fastidieuses, les automatismes sont encore souvent incapables d'évaluer finement

des situations incidentelles. Seul l'opérateur humain est capable d'appréhender la complexité d'une situation, et de prendre une décision à partir de son expérience, et de ses capacités d'intégrer des informations vagues et imprécises.

Bien que performant dans ce type de situation, l'opérateur humain connaît cependant des limites. Ses performances sont variables et dépendantes de son état physiologique (fatigue, santé, ...), de son état psychologique (motivation, ...), de sa connaissance du système à piloter et des exigences des tâches qu'il a à traiter (Milot, 88). Le système de contrôle et de supervision doit être capable de profiter des qualités de l'opérateur humain, des possibilités offertes par les automatismes, et de compenser leurs défaillances respectives. Le paragraphe suivant cherche donc, dans un premier temps, à souligner les caractéristiques de l'activité humaine lorsqu'elle s'applique à la supervision et au contrôle de procédés complexes.

2.2. Activités humaines dans la supervision et le contrôle de procédés

Deux principaux sujets sont détaillés ici. Il s'agit d'une part, de comprendre quelles sont les difficultés sous-jacentes au contrôle de procédés complexes. Plusieurs dimensions de ces procédés sont définies. D'autre part, ces dimensions sont exploitées pour tenter de construire des modèles de résolution de problèmes.

2.2.1. Les problèmes auxquels sont confrontés les opérateurs humains

Un procédé ne doit pas uniquement se définir en terme de systèmes et de sous-systèmes, mais il faut aussi le définir en fonction du comportement du système répondant à des entrées ainsi qu'en fonction de ses interactions avec l'environnement. La notion de situation est dans ce contexte entendue comme l'interaction entre le sujet et la tâche (Hoc, 87). Notre domaine de recherche est la supervision et le contrôle de procédé dynamique, c'est-à-dire des situations à forte composante dynamique. L'incertitude introduite par les situations dynamiques ne permet pas à l'opérateur humain de déduire entièrement l'état et l'évolution du procédé. L'opérateur humain est alors obligé de s'en construire un modèle et de le maintenir en permanence à jour. Le présent paragraphe montre comment l'opérateur humain construit son activité cognitive pour répondre aux exigences de ce type de situation.

Hoc (1996) définit les dimensions cognitives des situations dynamiques. Ces dimensions proviennent des caractéristiques physiques des procédés et impliquent des changements de stratégie de la part de l'opérateur humain. Ce sont l'étendue du champ de supervision, l'étendue du champ de contrôle, l'accessibilité, la vitesse et la continuité du procédé. Ces dimensions vues par la psychologie cognitive sont intéressantes pour l'automaticien car elles lui donnent un éclairage original et très utile sur les caractéristiques humaines. En effet, alors que l'automaticien modélise le procédé pour le contrôler par des systèmes de régulation, l'opérateur humain qui a en charge sa supervision et son contrôle, se construit aussi un modèle. C'est pourquoi nous essayons dans ce paragraphe de rapprocher les dimensions cognitives et les dimensions données par le formalisme de l'automatique, notamment la représentation d'état pour l'étude des systèmes dynamiques.

Pour ceci, nous nous appuyons sur une représentation d'un procédé supervisé et contrôlé (cf. figure I-2).

Cette figure présente plusieurs éléments, l'opérateur humain qui dispose d'une interface pour superviser et contrôler le procédé. L'interface peut être brute, informations sur l'état de capteurs, ou évoluée par présentation des informations sur une interface graphique assistant la lecture et l'analyse des données. Le procédé est composé du système et de fonctions permettant son contrôle (Borne, 93).

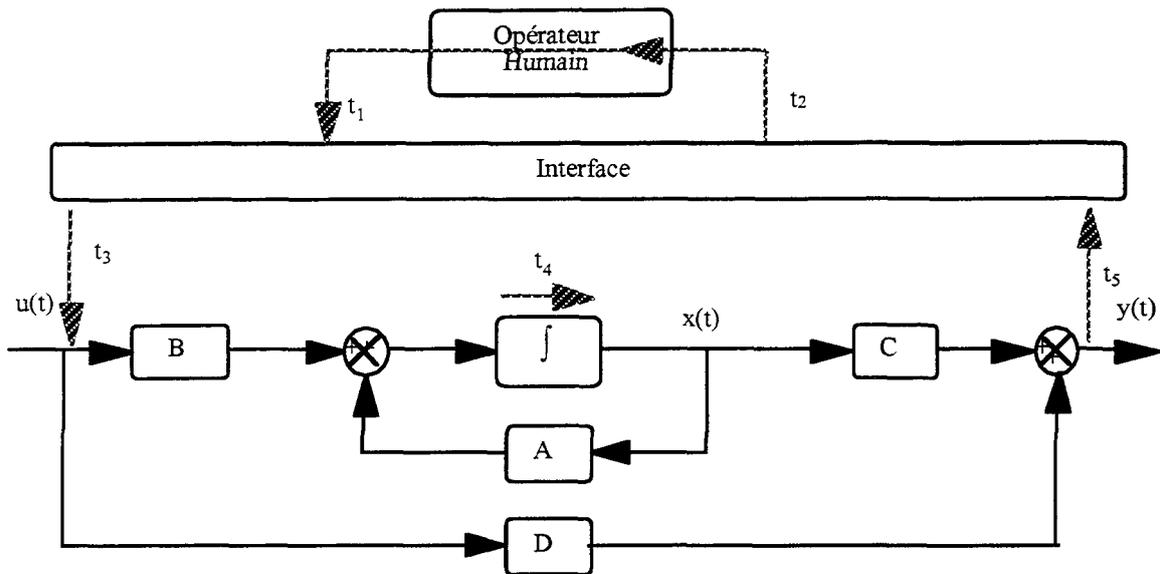


Figure I-2 : Représentation d'état et dimensions cognitives

Les grandeurs indiquées sont :

- $x(t)$: vecteur d'état,
- $u(t)$: vecteur de commande,
- $y(t)$: vecteur d'observation,
- A : matrice d'état,
- B : matrice de commande,
- C : matrice d'observation
- D : matrice de transition.

La figure distingue cinq temps : t_1 et t_2 sont propres à l'opérateur humain; t_3 , t_4 et t_5 sont issus du procédé. t_1 est le temps de prise de décision de l'opérateur sur la commande à appliquer, ajouté au temps de saisie de la commande sur l'interface. t_2 est le temps de lecture et d'interprétation de l'information. t_3 est le temps d'envoi de la commande au système. t_4 est le temps de réponse du système à la commande envoyée. t_5 est le temps nécessaire au retour d'information, c'est-à-dire à l'affichage de la sortie du système sur l'interface.

Ces temps sont connus de l'automaticien, mais ils sont aussi exploités par la psychologie cognitive. Il en est de même de la matrice d'état. Elle permet en effet, par l'intermédiaire du modèle de procédé, de prévoir l'évolution future du système en l'absence de perturbation.

L'étendue du champ de supervision se situe au niveau de l'interaction entre l'opérateur et l'interface, compte tenu du modèle de procédé que l'opérateur a pu se construire. Cette dimension est donc dépendante du niveau d'expertise de l'opérateur. Un champ de supervision trop étendu pénalise l'opérateur dans ses prises de décision. La raison est la difficulté de mise en relation des variables (de cause à effet) qui ne permet pas d'identifier le système, et d'en construire un modèle. Cependant un champ de supervision trop restreint pénalise l'opérateur qui est dans l'incapacité d'anticiper. Deux cas peuvent se produire. Le temps de prise de décision peut être trop court par rapport au temps d'obtention de l'effet ($t_1 \ll (t_2 + t_3 + t_4 + t_5)$). Un exemple est celui du pilote de chasse en phase d'attaque. A l'inverse, le temps de prise de décision peut être trop long par rapport au temps d'obtention de l'effet ($t_1 \gg (t_2 + t_3 + t_4 + t_5)$), et dans ce cas la décision risque d'être périmée. L'exemple typique est celui de la conduite d'un haut fourneau. Le champ de supervision est donc aussi à rapprocher de la notion de complexité du système.

L'étendue du champ de contrôle est due à la complication et à la dynamique du système. Elle se situe entre l'interface et le procédé. L'identification du procédé peut être difficile à réaliser non pas à cause de la difficulté d'établir des relations entre les variables, mais en raison du nombre trop important de variables. Un exemple peut être plusieurs boucles de contrôle en parallèle difficilement compréhensibles par l'opérateur humain en raison de sa capacité limitée. La psychologie cognitive utilise la notion de longueur de chaîne causale. Plus il y a de variables, plus

la chaîne causale est longue. Une faible étendue du champ de contrôle, soit la proximité de contrôle, correspond à un procédé *robuste*. Le risque survient du fait qu'une *perturbation* puisse s'insérer et qu'il ne soit pas possible d'y répondre. De plus, un champ de contrôle trop étendu implique des temps de réponse trop importants qui obligent l'opérateur à compenser l'absence d'informations sur les rétroactions des sorties par l'anticipation. L'expertise, et plus particulièrement la maîtrise des variables prédicatrices peut éviter à l'opérateur d'être pénalisé par le temps de réponse et d'observation du procédé ($t_4 + t_5$).

L'accessibilité du procédé est liée au concept d'*observabilité* puisqu'elle dépend de la disponibilité de la sortie $y(t)$. Une information directement accessible donne à l'opérateur humain la capacité matérielle d'extraire les paramètres pertinents. Dans le cas contraire, il fait des inférences à partir d'indicateurs qui lui permettent d'élaborer et de tester des hypothèses. Cependant, une information peut être assez accessible mais survenir trop tard. Dans ce cas, elle peut rester pertinente pour l'évaluation de la situation, mais plus pour l'action. Le retard avec lequel les informations apparaissent exige des opérateurs qu'ils construisent une prédiction, de façon à inférer des informations contemporaines à partir d'informations passées.

La vitesse du procédé influe sur la *fréquence d'échantillonnage*, c'est-à-dire la fréquence de prise d'information par l'opérateur pour superviser le procédé.

Un procédé rapide introduit des contraintes de temps qui empêchent l'opérateur de remettre profondément en question son plan. Dans ce cas, l'opérateur adopte une stratégie réactive.

A l'inverse, un procédé lent autorise l'opérateur à construire une planification quelquefois trop précise. Le procédé évoluant, l'opérateur est obligé de changer ses planifications, ce qui peut induire une performance médiocre due à une mauvaise utilisation du temps. L'opérateur adopte ici une stratégie anticipative.

La continuité du procédé représente ici l'évolution continue du procédé. L'opérateur détermine si la variation est significative ou non dans l'évolution du procédé. Sur une fréquence d'échantillonnage donnée, cette variation dépend du pas de discrétisation avec lequel le procédé est sondé.

Les dimensions cognitives ainsi définies caractérisent les procédés et soulignent les stratégies décisionnelles humaines théoriquement les plus adaptées. Delsart (1995) avance quatre types de stratégies :

- une stratégie basée sur *les représentations de l'évolution* des informations, plutôt que sur *les représentations statiques* de celles-ci, est propice à un procédé à caractère *continu*,
- une stratégie basée sur *les représentations qui soulignent les dépendances entre les informations (schématiques)* est propice aux procédés *complexes*, et/ou aux procédés dont *l'accessibilité est indirecte*,
- une stratégie basée sur *des hypothèses déductives* est propice au procédé dont *les temps de réponse sont longs* ou des systèmes à retard et impliquent *une forte anticipation*,
- une stratégie basée sur *de nombreux indicateurs fortement liés* est propice à une importante étendue du champ de contrôle d'un procédé.

Ces indicateurs peuvent orienter les concepteurs d'outils d'assistance dans le choix des interfaces afin de faciliter l'interaction homme-machine; ils peuvent aussi intervenir dans la conception des outils d'assistance afin qu'ils soient en adéquation avec l'activité cognitive de l'opérateur humain. Le paragraphe suivant propose notamment un éclairage sur les modèles de résolution de problèmes par les opérateurs humains dans la supervision et le contrôle de situations dynamiques.

2.2.2. Modèles de résolution de problème par l'opérateur humain

Les recherches menées par les sciences de l'ingénieur ont principalement porté sur la définition d'outils d'assistance, l'unique limite de conception étant la faisabilité technologique. L'un des autres axes de recherche est la définition des structures des systèmes homme-machine, c'est-à-dire l'intégration de ces outils d'assistance au sein de l'activité humaine décrite par les tâches prescrites. Cependant, la conception des outils d'assistance s'appuie maintenant de plus en plus sur les travaux des sciences humaines et de la vie, et en particulier sur les modèles de résolutions de problèmes de l'opérateur humain. L'apport de connaissance sur le fonctionnement cognitif de l'opérateur humain permet non seulement d'appliquer les principes de résolution de problèmes à la conception des moteurs d'inférence des outils d'assistance, mais en plus, il favorise le développement d'outils coopératifs, adaptés à l'activité humaine.

L'analyse de ces travaux amène dans un premier temps à examiner les modèles d'activité établis par les sciences humaines, et plus particulièrement les modèles ayant rapport aux activités de contrôle de situations dynamiques, caractérisées par un besoin de planification et de gestion des risques.

Ces modèles conduisent à reconsidérer la façon dont les procédés à conduire et superviser sont appréhendés. Il ne suffit pas de les décomposer en sous-systèmes, mais il faut aussi comprendre comment ils sont perçus et contrôlés par l'opérateur humain.

Jusqu'à présent, seule la partie explicite directement observable de l'activité cognitive de l'opérateur humain, c'est-à-dire son comportement, était analysée. Or les sciences humaines permettent aussi l'accès à la partie implicite, uniquement accessible par inférence ((Piaget, 47) dans (Hoc, 96)). Le présent paragraphe présente notamment les activités cognitives qu'il est possible de déduire des verbalisations des opérateurs humains en supervision et conduite de procédés. L'organisation de ces activités impose la construction de systèmes de représentation et de traitement. Ce sont des modèles internes développés à la fois par des effets de contexte et par l'effet de connaissances acquises (Hoc, 87). Ils sont constitués de la représentation des éléments du procédé, auxquels sont associées des propriétés. A ces éléments sont attribuées des opérations, les traitements. Le modèle de résolution de problème dynamique proposé par Hoc et Amalberti (1995) en est une illustration (cf. figure I-3).

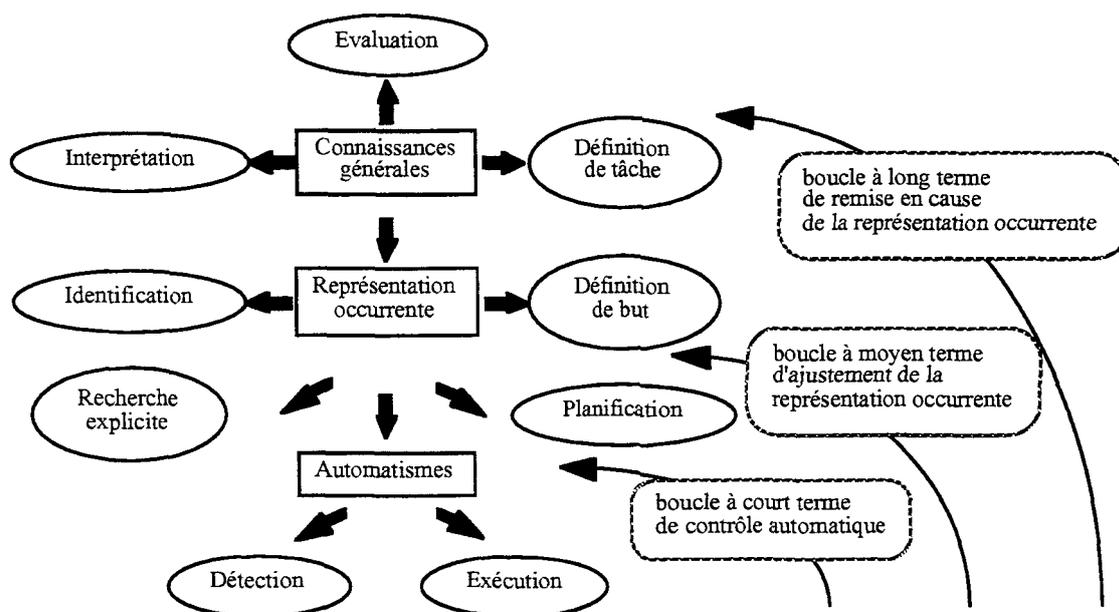


Figure I-3 : Modèle de résolution de problème en situation dynamique (Hoc & Amalberti, 95)

Il faut noter que dans le cadre de la supervision de situation dynamique, la notion de diagnostic est étroitement liée à la notion de pronostic. Ce type de situation implique en effet que le pronostic mené par l'opérateur se transforme en diagnostic du fait de l'évolution continue et souvent rapide du procédé. En Automatique, notamment en Commande adaptative (Landau, 86), cette assimilation se retrouve également. Des mesures sont effectuées sur le procédé avec l'objectif d'ajuster un régulateur au moyen d'un mécanisme d'adaptation. Ce mécanisme réalise alors un diagnostic conjugué à un pronostic pour déterminer les paramètres du régulateur.

Les activités d'élaboration d'information génèrent une base de données qui permet ensuite le développement *des activités de diagnostic*. Par le diagnostic, l'opérateur se construit une représentation de l'état du procédé, notamment à l'aide de son évolution passée, pour *inférer* un ensemble de données sûres (ou considérées comme telles) de son évolution future. *Les inférences* sont des élaborations d'hypothèses qui peuvent être *inductives* ou *déductives*. Elles sont inductives lorsqu'elles remontent la chaîne causale pour découvrir les causes possibles d'un phénomène. Elles sont déductives lorsqu'elles portent sur les conséquences d'un phénomène. Deux activités de diagnostic se distinguent :

- *L'inférence d'une hypothèse*.
- *Le test d'une hypothèse* qui modifie le degré de vraisemblance d'une hypothèse, quand les informations prises contemporaines sont différentes de celles qui étaient présentes au moment de l'inférence.

Un diagnostic étant construit, deux types d'activités liées à *la prise de décision d'intervention* se distinguent:

- *La décision schématique d'intervention* dénote le caractère schématique de la planification de la prise de décision d'intervention.
- *La décision précise d'intervention* où l'intervention est entièrement définie; toutefois, la mise en œuvre peut être immédiate ou différée.

L'opérateur humain évite en effet les situations où il devrait agir selon un mode réactif. Il préfère le mode anticipatif qui lui permet de préparer plusieurs plans, et ainsi de répondre rapidement aux événements imprévus des situations dynamiques. Hoc (1987) considère l'anticipation comme la construction d'une représentation qui précède la rétroaction effective apportée par l'exécution ou les résultats de l'action. Elle se traduit par la fixation de buts relativement lointains et de procédures pour les atteindre.

De même, *la planification* est considérée comme une activité d'élaboration et d'utilisation de plans pour guider l'activité. *Les plans* sont une (des) représentation(s) schématique(s) ou (et) hiérarchisée(s) du procédé. Les plans sont *déclaratifs* lorsqu'ils portent sur les états du procédé. Ils sont *procéduraux* lorsqu'ils indiquent une procédure à suivre coordonnant les opérations à réaliser. Enfin, ils sont *fonctionnels* lorsqu'ils soulignent les relations entre les fonctions. La planification est *prospective* lorsqu'elle établit les étapes permettant d'atteindre le but fixé à partir de l'état initial de la situation. Dans le cas contraire elle est *rétrospective*. La planification se définit en fonction de deux démarches, l'une ascendante et l'autre descendante. *La démarche ascendante* élabore les plans de leur ébauche à leur construction détaillée ou à leur remplacement par d'autres plans en fonction de l'apparition de nouvelles informations sur l'état et l'évolution du procédé. *La démarche descendante* a trait au raffinement et à la mise en œuvre des plans, par décomposition d'un but en sous-buts, en particulierisant le but, ou en traitant les interférences entre buts.

Ces activités participent à la construction de l'activité de l'opérateur qui établit des pronostics et des diagnostics, définit les buts dédiés à la régulation ou à la correction de l'état du procédé, et qui planifie les actions réalisant ces buts. Les différentes étapes de ces trois phases sont décrites

figure I-4. Les informations circulent d'une fonction à l'autre, les pointillés soulignant les attentes de l'opérateur.

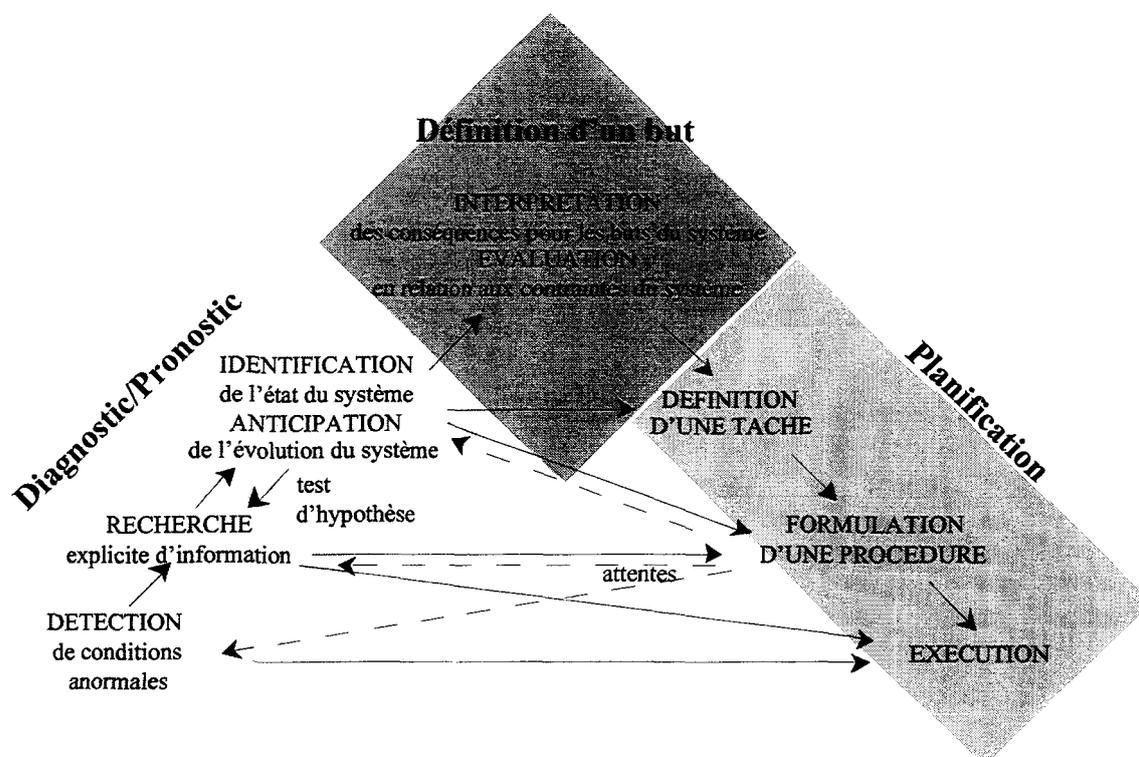


Figure I-4 : Échelle double de Rasmussen révisée, adaptée de (Hoc, 96).

L'échelle double de Rasmussen est révisée sur trois points :

- l'identification de l'état du système (diagnostic) peut conduire à une anticipation de l'évolution du système (pronostic),
- les stratégies d'élaboration et de test d'hypothèses conduisent à ajouter des transferts d'information de l'identification vers la recherche d'information,
- l'ajout de boucles de rétroaction pour rendre compte des effets d'attente imposés par les caractéristiques dynamiques du procédé.

Selon les recherches menées en psychologie cognitive, l'opérateur humain construit son activité de façon à gérer ses ressources internes que sont les ressources attentionnelles, les compétences et les habiletés. La régulation des ressources attentionnelles se contrôle par développement de règles ou de connaissances conceptuelles. Contrairement aux opérateurs débutants dont la capacité attentionnelle explose lorsque la complexité du procédé augmente, l'expert cherche à manipuler des représentations schématiques, plus économiques en capacités d'attention. Il répartit son activité entre les différents niveaux de contrôle (cf. figure I-5) et mène à la fois des traitements parallèles et en temps partagé (Hoc, 96).

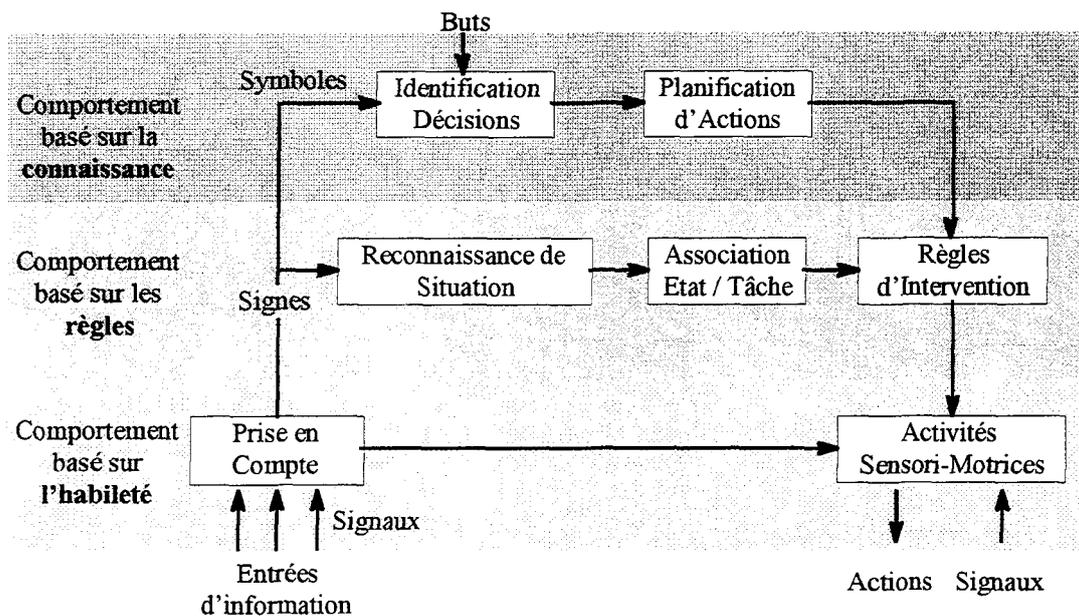


Figure I-5 : Modèle des comportements de l'opérateur humain, (Rasmussen, 83).

L'opérateur adopte trois niveaux de régulation de ses activités (Rasmussen, 83) :

- Une régulation basée sur l'habileté (skill based behavior) où il exécute les actions nécessaires de façon routinière ou de façon quasi automatique, en exploitant des stimuli perceptifs (en psychologie ce sont des signaux), sans disposer d'une analyse détaillée de l'état du procédé (en psychologie : représentation symbolique).
- Une régulation basée sur des règles (rule based behavior) qu'il choisit, face à une situation familière, dans un ensemble de règles prédéfinies. Ces règles sont déclenchées par des informations qui correspondent à des états du procédé (en psychologie ce sont des signes qui correspondent à un décodage des représentations symboliques).
- Une régulation basée sur la connaissance (knowledge based behavior) où il élabore des stratégies de résolution de problèmes et choisit la stratégie optimale pour contrôler un état nouveau ou imprévu du procédé. C'est une régulation basée sur des concepts (en psychologie ce sont des symboles qui correspondent à des interprétations des représentations symboliques).

Une façon complémentaire d'exploiter les modèles cognitifs précédents est l'analyse des erreurs. Les erreurs peuvent en effet provenir de l'inadéquation des rôles attribués aux opérateurs humains dans un système homme-machine.

2.2.3. Les erreurs humaines

Reason (93) propose une taxonomie des erreurs en fonction des trois niveaux de contrôle de Rasmussen (83).

Au niveau basé sur des habiletés Reason a identifié quatre facteurs pouvant être sources d'erreurs. Ces erreurs sont dues à des routines ou schémas qui sont activés alors qu'ils ne répondent pas au problème. Les facteurs sont :

- la fréquence d'utilisation et l'utilisation récente d'une routine,

- *la présence de signaux déclencheurs dans l'environnement* favorise l'activation de processeurs et schémas disponibles en mémoire,
- *le partage de composantes schématiques* qui active des schémas ayant des composantes communes avec un schéma initial,
- *la présence de schémas ou de plans concurrents* qui déclenche des actions sur des objets dont le champ d'application appartient à d'autres types d'actions.

Nous retrouvons le même principe *au niveau basé sur les règles*; l'erreur consiste à activer une règle alors qu'elle ne répond pas à la demande. Les facteurs pouvant déclencher une règle sont :

- *la prédisposition mentale*, lorsque l'opérateur applique un type de solution expérimentée avec succès dans le passé alors que les conditions d'application ne sont pas valides ou qu'il existe d'autres solutions plus adéquates.
- *la disponibilité* en mémoire d'une règle,
- *le biais d'appariement* par rangement d'un ensemble de données dans une classe non adéquate en raison de similarités entre des caractéristiques saillantes,
- *une simplification excessive* en n'évaluant un objet que dans une dimension unique,
- *le biais de confirmation* qui ne justifie une démarche que par une sélection de données confirmant cette démarche au détriment des données contradictoires.

Au niveau basé sur des connaissances les facteurs influençant l'erreur sont principalement dus à la limitation de la mémoire de travail :

- *le principe de rationalité limitée* n'autorise pas de solutions satisfaisantes, donc non exhaustives, ni optimales,
- *la sélectivité* focalise l'attention de l'opérateur sur des aspects psychologiquement saillants du problème plutôt que sur des aspects véritablement utiles pour la résolution,
- *les limitations de la mémoire de travail* sont positionnées par les opérateurs qui cherchent à maintenir une valeur acceptable de leur charge de travail,
- *"hors de la vue, hors de l'esprit"* apparaît suite à une interruption du mécanisme de réflexion par une capture attentionnelle ou à une surcharge de travail,
- *le vagabondage thématique et la persévérance* se produisent lorsque l'opérateur ne suit pas une démarche précise dans la construction de son raisonnement,
- *le raisonnement par analogie* apparaît comme une source d'erreur lorsque l'analogie est inadaptée et fournit un schéma de résolution erroné,
- *le biais d'appariement* est à l'origine d'erreurs systématiques lorsque des jugements basés sur la similarité s'avèrent inadaptés,
- *les connaissances incorrectes ou incomplètes*.

Nous avons maintenant à notre disposition différentes formes avancées d'un modèle, celui de Rasmussen révisé par Hoc. Elles ont la particularité de souligner les aspects où l'opérateur humain est le plus performant, notamment par ses mécanismes d'économie cognitive, ou encore par ses facilités d'adaptation aux situations imprévues. Cependant, ces mécanismes cognitifs

peuvent être à la base d'erreurs. Le paragraphe suivant tente alors d'exploiter ces modèles pour déduire les besoins humains en supervision et en contrôle de procédés complexes.

2.3. Identification des besoins humains en supervision et en contrôle.

Les paragraphes précédents ont présenté les modèles d'activité de l'opérateur humain et les tâches qu'il doit réaliser. Nous allons maintenant donner une description des besoins des opérateurs en terme d'outils d'assistance.

Dès 1989, Taborin propose une synthèse des systèmes d'aide à l'opérateur de conduite de procédés, en fonction de ses objectifs :

- favoriser les comportements automatisés des opérateurs par une mise en forme des informations leur permettant de discriminer les actions à exécuter,
- favoriser la détection de défauts par un filtrage et une hiérarchisation des alarmes aidant l'opérateur à évaluer la situation, et ce en lui présentant des variables compatibles avec son modèle du procédé,
- aider l'opérateur dans des tâches de planification/correction par un "manuel opératoire actif" le guidant dans l'exécution des procédures, ou en lui signalant l'existence d'actions erronées au regard de certains critères.

Sheridan (1992) détaille les principales fonctions de l'activité de l'opérateur humain, et associe à chaque tâche de supervision les types d'outils d'assistance pouvant répondre à leur objectif. Le tableau I-1 rappelle les étapes que sont, la planification des actions, la surveillance qui permet d'établir les pronostics et diagnostics, l'intervention par exécution des actions. Mais Sheridan complète ces étapes avec la transmission de commande dont l'intégration facilite la reconnaissance ou la mise en place des actions à entreprendre. Il intègre aussi la notion d'apprentissage, module permettant de mémoriser l'historique du procédé et pouvant aider à l'analyse du système.

<i>Étapes</i>	<i>Tâches</i>	<i>Assistance</i>
Planification	Comprendre le procédé contrôlé	Simulateur d'entraînement
	Satisfaire les objectifs	Aide aux choix des objectifs
	Définir une stratégie générale	Procédures d'entraînement et aide à la construction de stratégies optimales
Transmission des commandes	Sélectionner les procédures	Bibliothèques de procédures
	Transmettre les commandes	Aide à l'édition des commandes
Surveillance	Acquérir les informations	Aide à l'évaluation et à l'agrégation des mesures
	Évaluer l'état du procédé en fonction de son état présent et des actions de contrôle passées	Aide à l'évaluation de l'état du procédé
	Détecter et diagnostiquer les dysfonctionnements	Aide à la détection et au diagnostic des pannes
Intervention	En cas de panne, exécuter les procédures d'abandon (appel à maintenance)	Aider à l'exécution des procédures d'abandon
	En cas d'erreur bénigne, rectifier	Aider à la rectification des erreurs
	En cas de situation normale, continuer la procédure	Aider au suivi de la procédure
Apprentissage	Enregistrer les événements	Enregistrements automatiques
	Analyser les situations	Aide à l'analyse

Tableau I-1 : Assistance aux tâches de supervision, (Sheridan, 92)

A partir des définitions des activités cognitives présentées dans ce chapitre, Hoc (1987) relève différentes aides qui facilitent ou faciliteraient les activités d'anticipation, de schématisation, de planification de l'opérateur humain.

- *Les aides à la résolution de problèmes* doivent davantage prendre en compte l'activité de schématisation de l'opérateur humain, de façon à ce que le modèle construit par l'outil d'assistance soit en adéquation avec le modèle interne de l'opérateur humain.
- De même, *les aides à l'anticipation* sont généralement des interfaces graphiques présentant les tendances d'évolution des variables du procédé. Il est en effet difficile pour l'opérateur humain de projeter dans le temps l'état d'une variable, ce problème étant encore plus apparent lorsqu'il s'agit de plusieurs variables dépendantes. Ces aides peuvent également consister en des logiciels de simulation ou d'aide à la prédiction permettant à l'opérateur d'évaluer ses plans et au besoin de les corriger. L'auteur note qu'il existe peu d'assistances facilitant l'articulation des démarches ascendantes et descendantes qui permettraient à l'opérateur d'établir un compromis entre un plan opérationnel mais trop précis et pouvant être vite remis en question, et un plan trop schématique ne permettant pas de répondre rapidement à l'apparition d'un événement imprévu. Cependant, les outils d'assistance ne doivent pas non plus inciter les opérateurs à développer des stratégies très détaillées alors que ceux-ci ont déjà développé des automatismes permettant de réguler leur charge de travail.
- Enfin, *les aides à la schématisation* sont principalement des représentations graphiques de l'ensemble des objets traités. Pour être efficaces, ces outils d'assistance sont construits de façon que la représentation soit la plus proche possible de celle de l'opérateur, afin de lui éviter toute reconstruction cognitive.

De la connaissance des systèmes de représentation élaborés par l'opérateur humain, il est possible de tirer des indicateurs sur la conception des interfaces graphiques des outils d'assistance. Samurçay (1993) distingue deux types de représentations du procédé : la représentation *interne*, mentalement construite par l'opérateur, puis la représentation *externe*, exprimée dans un support physique. Les interfaces graphiques sont les supports de la représentation externe. Ces interfaces constituent des intermédiaires, soit comme compléments de la perception directe par l'opérateur de tout ou partie de la situation, soit comme seul dispositif externe pour construire la représentation (Bisseret, 95). Les interfaces, elles-mêmes construites à partir d'une représentation (celle que le concepteur a du procédé) dirigent l'opérateur dans son activité d'élaboration de sa représentation. Le rapprochement entre ces deux représentations, interne et externe, ne peut que faciliter la maîtrise du procédé par l'opérateur humain.

En complément, Delsart (1995) définit un nouveau type de représentation, la représentation *alter*. Son utilisation suppose que l'opérateur construise sa propre représentation de la représentation construite par autrui. La représentation alter est en fait la compréhension par l'opérateur du comportement de l'autre, homme ou machine. Meilleure sera la compréhension, meilleure sera la coopération. Le troisième paragraphe de cette partie montrera de quelle façon il est possible d'accéder à la représentation interne de l'opérateur et ainsi de développer des outils d'assistance (interfaces, systèmes automatisés) plus adaptées à cette représentation. Ce point de vue permettra également d'éclairer des concepts plus avancés comme la coopération Homme-Homme ou Homme-Machine.

La connaissance des prises de risque et des erreurs humaines peut aussi permettre de comprendre le fonctionnement cognitif de l'opérateur mais aussi et surtout ses faiblesses, et ainsi de définir des outils d'assistance, dans le domaine du possible, qui les compensent. Est évoqué ici l'un des principes présentés par Billings (1991) à savoir, "*les systèmes automatiques de commande devraient être conçus de telle sorte qu'ils soient le plus possible tolérants à l'erreur*". Lewis et Norman (1986, dans (Masson, 95)) ont identifié six stratégies pour qu'un système automatisé puisse parer les actions des opérateurs reconnues comme erronées.

Sous réserve de leur faisabilité technique, ces stratégies sont :

- *le blocage* : l'outil d'assistance empêche l'opérateur de traduire en action des intentions inacceptables ou irréalisables, en bloquant l'interface de commande,
- *la mise en garde* : l'outil d'assistance n'a ici qu'un rôle informatif en indiquant à l'opérateur le danger potentiel de certaines actions,
- *la non exécution* : l'outil d'assistance empêche cette fois la mise en œuvre d'une action, en ne transmettant pas la commande, puis se justifie,
- *l'autocorrection* : à partir de la reconnaissance d'une erreur de l'opérateur, l'outil d'assistance en déduit l'intention de l'opérateur, puis remplace l'action éronnée par une action appropriée,
- *le "parlons-en"* : l'outil d'assistance entame un dialogue avec l'opérateur afin de rechercher l'erreur,
- *le "enseigne-moi"* : l'outil d'assistance demande à l'opérateur de lui apprendre la signification d'une commande qu'il n'a pas reconnue.

Suivant les compétences des outils d'assistance, Finin et Klein (87) différencient quatre modes d'intégration selon que leurs entrées et sorties sont automatiques ou manuelles (cf. tableau I-2) :

- *Consultant* : l'opérateur humain fournit à l'outil d'assistance les informations issues du procédé. L'outil lui renvoie des conseils d'actions que l'opérateur humain peut appliquer sur ce même procédé.
- *Surveillant* : l'outil acquiert automatiquement les données issues des capteurs du procédé, puis analyse l'état du procédé, et renvoie à l'opérateur des conseils d'actions afin que celui-ci les exécute lui-même.
- *Servant* : les données à traiter par l'outil sont entrées manuellement par l'opérateur et les sorties sont appliquées automatiquement sur le procédé. Ce mode d'interaction homme-machine est donc très critiquable du point de vue ergonomique puisqu'il confère à l'opérateur un rôle passif de collecteur de données en lui retirant toute possibilité de prise de décision.
- *Agent* : ce mode d'intégration de l'outil d'assistance correspond à une automatisation complète de la décision puisqu'il décharge l'opérateur humain des tâches d'intégration des données, et prend en charge la mise en œuvre des actions. L'outil d'assistance doit donc être fiable et robuste, ce qui peut être difficile dans le cas de la supervision des procédés complexes. En revanche, il est réaliste d'envisager qu'un sous-ensemble des tâches soit automatisé à partir d'un agent.

		Acquisition des informations	
		Opérateur humain	Outil d'assistance
Actions sur le procédé	Opérateur humain	Consultant	Surveillant
	Outil d'assistance	Servant	Agent

Tableau I-2 : Catégories d'outils d'assistance (Finin & Klein, 87)

Dans le cadre de cette recherche sur la supervision et le contrôle de procédés complexes, nous nous plaçons plus précisément sur les modes *agent* et *surveillant*.

Ce paragraphe a parcouru plusieurs types d'outils d'assistance, mais il ne suffit pas de disposer de ces outils, encore faut-il préciser comment les intégrer au cœur de l'activité humaine de façon à ce qu'une réelle coopération puisse se mettre en place entre l'homme et la machine. Cette coopération homme-machine initialisée au paragraphe suivant est au centre de cette thèse.

3. Coopération homme-machine

3.1. Généralité et concepts

La coopération homme-machine est un thème de recherche pluridisciplinaire entre les sciences pour l'ingénieur (automatique, informatique) et les sciences cognitives et sociales (psychologie et sociologie du travail ...). Les sciences pour l'ingénieur tentent de la caractériser en fonction des objectifs du procédé et des outils d'assistance pouvant intervenir. Ces outils d'assistance ne consistent plus uniquement en des automatismes classiques capables de prendre en charge une partie du procédé, mais permettent de couvrir une plus grande partie de l'activité de l'opérateur humain, de la détection d'un état anormal du procédé à la prise de décision, voire à l'action automatique.

Cependant, la définition de ces outils d'assistance ne porte que sur les limites techniques de conception. Les principes de coopération définis par *l'Automatique Humaine* ajoutent à ces catégories d'outil d'assistance de nouvelles caractéristiques visant une intégration cohérente des assistances, en tenant compte par exemple de la performance propre obtenue et des conditions de travail de l'opérateur qui a la charge du procédé (Millot, 88). Les sciences de la vie, et en particulier la psychologie cognitive donnent une définition de la coopération homme-machine principalement inspirée de la coopération Homme-Homme.

Hoc (1996) considère que *deux agents d'un système sont en situation de coopération aux deux conditions suivantes* :

- *ils poursuivent chacun des buts qui peuvent entrer en interférence, soit au niveau des résultats, soit au niveau des procédures,*
- *et ils font en sorte de traiter ces interférences pour que les activités de chacun soient réalisées de façon à faciliter la réalisation de celles de l'autre.*

A partir de cette définition très générale, il s'agit de préciser les notions de but et d'interférence, et de facilitation. Le but initial est commun, et consiste à superviser et contrôler le procédé. Mais il pourrait être utile de rechercher jusqu'à quel niveau de précision les buts sont similaires, et dès qu'ils diffèrent, c'est-à-dire dès qu'il y a interférence entre buts, veiller à ce que la gestion de ces interférences soit bénéfique (interférence positive). L'intérêt de la gestion d'interférence entre buts n'apparaît que si l'augmentation potentielle de la charge de travail de l'opérateur humain est compensée par la pertinence de l'outil d'assistance sur le problème posé. Il faut en effet veiller à ce que la charge de travail dépensée dans la communication et la coordination soit minimale, et que la tâche soit appropriée à la coopération, puisqu'il s'agit d'optimiser le contrôle du procédé.

L'application de cette définition de la coopération homme-machine est difficile à cause de l'asymétrie du système homme-machine provenant de la responsabilité de l'homme, qui détient l'ultime décision d'action sur le système. Par ailleurs, la notion de facilitation implique la reconnaissance des intentions de l'autre. Il est concevable de penser que l'opérateur ait connaissance de toute intervention des automatismes sur le système, notamment au moyen de la formation et des facilités apportées par l'informatisation. En revanche, il est moins facile de mettre en œuvre une reconnaissance d'intentions de la part du système.

Les approches sociologiques sont quelque peu trop macroscopiques pour étudier la coopération développée au sein d'un unique couple d'agents. Cependant, nous pouvons relever l'approche pertinente de Schmidt (1994). L'auteur présente trois formes de coopération qui soulignent les fonctions de la coopération.

- *La coopération augmentative* : elle trouve son fondement dans les limitations de capacités de traitement d'un seul agent (charge de travail). Les agents ont ici des capacités cognitives et décisionnelles similaires. La coopération augmentative cherche à combiner et agréger ces capacités. Un exemple est la délégation de tâches.
- *La coopération intégrative* : elle s'appuie sur le fait que les compétences d'un seul agent ne lui permettent pas de réaliser la tâche. Elle nécessite de faire appel à plusieurs agents ayant des compétences et capacités complémentaires. La coopération intégrative a pour objectif d'intégrer la contribution de chaque agent. Un exemple est la recherche pluridisciplinaire.
- *La coopération confrontative* : elle est liée à la rationalité limitée d'un seul agent. Les compétences des agents peuvent être similaires, mais c'est la confrontation des résultats obtenus par plusieurs agents qui dégage la bonne solution. Un exemple est la recherche monodisciplinaire.

Clarke (1996) présente des concepts similaires en distinguant respectivement la notion de *possibilité* d'exécuter une tâche (fonction de la capacité), la notion de *synergie* pour l'intégration des compétences de plusieurs agents, mais aussi d'*efficacité*, lorsque la coopération minimise les efforts demandés pour atteindre le but.

Des définitions de la coopération se caractérisent les notions de *collaboration* et de *coaction*. La possibilité de négociation entre les agents définit la différence majeure entre la collaboration et la coopération. Pour Dillenbourg & Baker, les agents coopèrent s'ils produisent des solutions séparées en parallèle, et qu'il y a peu d'interaction entre eux. Alors que la collaboration est le résultat d'un effort régulier de construction et de maintien d'une conception partagée du problème. La collaboration, ainsi que la coaction et la coopération distribuée, font aussi l'objet d'une distinction dans (Rogalski, 94). A partir des situations présentant des activités collectives, l'auteur distingue deux principales formes, *la collaboration*, où les acteurs partagent la même tâche prescrite, et *la coaction*, où les agents adoptent des buts immédiats différents, mais partagent un espace commun et des ressources communes. *La coopération distribuée* constitue la moyenne de ces deux formes. L'identification et la distribution de tâches, ainsi que la synchronisation des activités en sont les points clés. Les buts immédiats des acteurs diffèrent mais concourent à une tâche commune.

Comme nous l'avons vu, les outils d'assistance sont élaborés de façon à faciliter, compléter ou suppléer les tâches de communication, de perception, les tâches cognitives et motrices de l'opérateur humain (Gawron, 89). Ces outils, systèmes automatiques et/ou informatiques, augmentent en "intelligence" en développant leurs capacités d'adaptation à l'activité humaine (Hoc, 95). Cette progression permet aujourd'hui non plus de parler d'*interaction homme-machine*, ni de *communication homme-machine*, mais bien de *coopération homme-machine*. L'interaction homme-machine s'attache en effet à articuler les tâches que la machine est capable d'effectuer, au travail cognitif de l'opérateur humain; la communication homme-machine se préoccupe davantage du développement des outils de communication homme-machine (reconnaissance de la parole, de geste, ...), mais la coopération homme-machine a pour objectif une adaptation cognitive réciproque des agents humains et artificiels.

Ces différentes tentatives de définition de la coopération font ressentir le besoin de mieux comprendre tout ce qui a trait à la coopération. Un éclairage est proposé par Millot & Hoc (1997) qui suggèrent de distinguer le concept de *savoir-coopérer* et celui de *savoir-faire* de façon à se poser les bonnes questions sur la coopération et ce, en vue d'une définition plus précise et plus opérationnelle.

3.2. Notions de savoir-faire et de savoir-coopérer

Ce paragraphe a pour objectif la définition de l'adaptation des outils d'assistance à l'activité humaine en terme de savoir-faire et de savoir-coopérer. Nous tenterons de donner une définition à ces notions, puis nous reprendrons quelques définitions de la coopération présentées ci-dessus afin de les illustrer.

3.2.1. Le savoir-faire

Une définition du savoir-faire est, l'habileté à résoudre les problèmes pratiques; c'est la compétence, l'expérience dans l'exercice d'une activité artistique ou intellectuelle (Le Robert, 92). Le savoir-faire a trait à la résolution de problèmes. Tout agent, qu'il soit humain ou artificiel, dispose de compétences et d'expériences qui lui permettent de construire un savoir-faire (Amalberti, 91). Le début de ce chapitre en a cité de nombreux exemples, notamment les mécanismes cognitifs humains pour la résolution de problèmes. Du côté machine, les outils d'aide à la décision, qu'ils soient fondés en Intelligence Artificielle ou en Automatique, en sont aussi de nombreux exemples que l'automaticien a en mémoire.

La notion de savoir-faire est un élément de définition des formes de coopération de Schmidt (94). Les variantes entre ces formes proviennent des savoir-faire qui sont soit différents, soit évalués, les savoir-coopérer étant supposés équivalents (cf. figure I-6). Dans le cas d'une coopération intégrative les savoir-faire sont différents. La coopération consiste à apporter son savoir-faire à l'autre; elle peut être unidirectionnelle ou bidirectionnelle. Il en est de même de la coopération augmentative, mais cette fois les agents ont des savoir-faire identiques. La coopération se traduit lors par un partage de tâches qui a pour objectif de soulager un agent d'une partie de ses tâches. Il n'y a pas d'évaluation du savoir-faire de l'agent qui assiste, par l'agent assisté. C'est ce dernier point qui le différencie de la coopération confrontative où les agents ont des savoir-faire identiques, et chaque agent, ou un seul agent, évalue le savoir-faire de l'autre sur une résolution de problème. Sur ces formes de coopération, ce sont les fonctions de la coopération qui sont soulignées. Il en est de même dans les définitions de la coopération distribuée de Rogalski (94), et de Boy (95) où l'identification, la distribution et la synchronisation des tâches des agents sont des points clés.

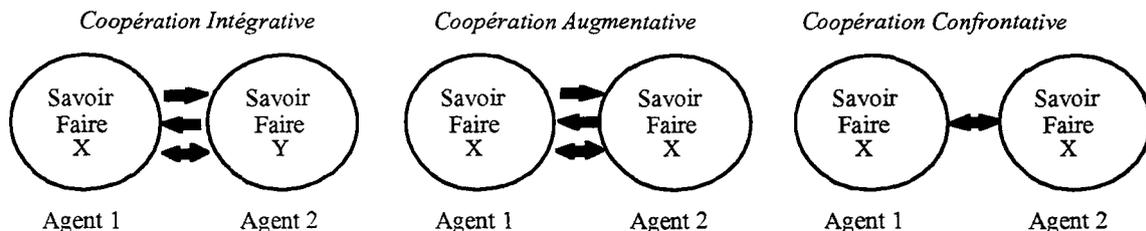


Figure I-6 : Formes coopératives et savoir-faire

Cependant la définition de la coopération ne se réduit pas à une attribution de rôle, il faut aussi rechercher les mécanismes et les moyens de coopération. Ce sont sur ces valeurs que se définit le savoir-coopérer.

3.2.2. Le savoir-coopérer

Le savoir-coopérer est l'ensemble des capacités nécessaires pour coopérer avec autrui. C'est la compétence et l'adresse avec lesquelles plusieurs agents sont capables de partager et de faire évoluer des éléments communs.

L'une des prérogatives du savoir-coopérer est que les agents coopèrent ouvertement et consciemment. C'est une condition nécessaire proposée par Boy (95) pour la coopération collective. De même, Schmidt (94) évoque la *prise de conscience réciproque* de l'existence de l'autre agent durant l'activité. Sur cette base, nous retrouvons aussi la première partie de la définition de la coopération de Hoc (96), c'est-à-dire que la coopération suppose la création, la

détection et la gestion d'interférences entre buts. Cette définition représente déjà une avancée opérationnelle de la coopération, mais l'auteur ajoute que les interférences entre buts ont pour objectif la facilitation des buts de l'autre. Comme nous l'avons déjà exprimé, cette définition sous-entend la *compréhension mutuelle des actions et des intentions* des agents (Masson, 95). Le savoir-coopérer demande à être appris et entretenu. Il peut consister à *attirer l'attention* de l'autre agent sur l'état du procédé. La prise de décision se fait ensuite par *une négociation* entre les deux agents. Ce principe impose alors un support à la reconnaissance d'intention.

Les définitions de la collaboration et de la coaction ont souligné la nécessité de partager un espace de travail et des ressources afin de maintenir une conception partagée du problème. Le savoir-coopérer passe donc par la construction d'un support pour aider l'interaction entre les agents. L'un des modes de coopération de Schmidt porte notamment sur la qualité physique de l'interaction. La coopération peut alors être *proche ou distante*. Dans le même sens, Boy parle de coopération *directe ou médiatisée*, le dernier cas suppose que les agents communiquent via un système technique. La coopération impose que la communication soit bidirectionnelle, peut-être multimodale, c'est-à-dire, à la fois verbale et non verbale, vocale, visuelle, tactile ou autres. Dillenbourg & Baker (1996) soulignent en effet que la négociation homme-machine implique des possibilités d'interactions symétriques, mais que la symétrie n'implique pas "l'identité entre l'homme et la machine". L'opérateur humain et l'outil d'assistance peuvent ne pas effectuer les mêmes tâches, ni avoir les mêmes compétences, mais les deux agents doivent être complémentaires.

Le savoir-coopérer apparaît donc au niveau d'un support qui permet de partager et de confronter des données, mais aussi des décisions, sur le procédé à contrôler. De cette façon, différents objectifs de coopération peuvent être atteints. Plusieurs types de coopérations ont notamment été relevés dans Hoc & Lemoine (97). La coopération peut avoir comme objectif l'attribution des rôles, la métacoopération, la construction d'un référentiel commun, la définition des buts.

L'attribution des rôles, ou l'évolution des rôles (Pavard, 94), peut être considérée du point de vue du savoir-coopérer comme du point de vue du savoir-faire. Si les compétences ou capacités des agents sont différentes alors l'attribution des rôles est fonction du savoir-faire. Mais ceci n'exclut pas la présence de savoir-coopérer qui renseigne chaque agent sur les rôles attribués. Dans le cas contraire, où chaque agent dispose des mêmes compétences, il est possible de supposer que l'attribution des rôles est uniquement fonction du savoir-coopérer. En effet, le partage de tâches peut être plus souple pour plus d'efficacité, mais ce principe implique davantage d'interactions entre les agents, donc plus de savoir-coopérer.

La métacoopération relève principalement du savoir-coopérer puisqu'elle incite les agents à se définir des mécanismes, des moyens de coopération. La définition de la métacoopération peut s'enrichir au cours de l'activité et ainsi servir de base au savoir-coopérer.

Le référentiel commun est défini par trois aspects : — une échelle commune de valeurs intellectuelles sur laquelle il est possible de se référer en cas de désaccord, — une évaluation commune du procédé, — la capacité de rediscuter les propositions précédentes (Piaget, 65). Le référentiel commun est une condition essentielle du savoir-coopérer puisqu'il permet à chaque agent de disposer des éléments du procédé indispensables à l'évaluation de son état. Le référentiel commun permet à chaque agent d'inférer les intentions des autres agents, ce qui constitue le dernier point évoqué à savoir *la définition des buts*. Lorsque la coopération porte sur un but, elle a différents intérêts. En effet, la définition des buts impose, en premier lieu, *un contrôle mutuel* des agents. C'est un mécanisme qui renseigne les agents sur le bon déroulement de l'activité et de la coopération. Le contrôle mutuel amène à *identifier les buts* de l'autre agent. Il peut entraîner *une détection d'interférences* entre les buts de chaque agent. Dans ce cas, les agents doivent *gérer les interférences* de façon à conclure sur les buts à atteindre, mais aussi sur le partage de tâches. Il est à noter qu'une interférence entre buts peut être une conséquence de différences entre les référentiels de chaque agent. La gestion d'interférences peut donc aussi se réaliser à ce niveau. Enfin, comme nous l'avons déjà indiqué, la coopération a pour objectif essentiel *la facilitation* du but de l'autre agent.

Ces objectifs de coopération nécessitent l'utilisation de moyens de communication. Les principaux moyens de communication relevés par Hoc & Lemoine (97) sont des messages d'accord ou de désaccord (révérification par l'autre agent), d'apport ou de demande, de confirmation ou d'infirmité (accusé de réception), d'évaluation, de marquage, de précision, de surprise, de traduction (traduction dans ses propres termes, ou dans son propre modèle, ce qui vient d'être dit).

Les conditions de coopération que nous venons de présenter ont pris comme référence la coopération homme-homme. Il est vrai qu'elle constitue un modèle pour la coopération homme-machine, cependant de nombreux points cités dans les paragraphes précédents ne peuvent être appliqués lorsque l'un des agents est artificiel, ne serait-ce que pour des difficultés de faisabilités techniques. Cette asymétrie est discutée dans le paragraphe suivant.

3.2.3. Restrictions imposées par la coopération homme-machine

Les restrictions imposées par l'introduction d'un agent artificiel portent principalement sur le savoir-coopérer. Le savoir-faire des outils d'assistance ne cesse de s'accroître, mais comme nous l'avons déjà évoqué de nombreuses fois, si l'homme doit superviser ces outils alors le savoir-coopérer doit suivre cette augmentation de savoir-faire. Rien ne sert d'avoir un outil perfectionné si celui-ci est inutilisable, faute de notice d'emploi, ou d'inadéquation aux besoins. Le savoir-coopérer des outils d'assistance porte donc principalement sur la facilitation des buts de l'opérateur humain. Il est encore en effet difficile de concevoir actuellement un outil d'assistance capable de détecter des interférences entre buts, puisque ce principe suppose qu'il y ait reconnaissance des intentions de l'autre agent, à savoir l'opérateur humain. Cependant, il est possible de contraindre le savoir-faire d'un outil d'assistance de façon à ce que son savoir-coopérer réponde aux attentes de l'opérateur humain. L'analyse du couple homme-machine, éclairée de ces notions, positionne l'outil en tant que membre passif, et l'homme en tant que membre actif de la coopération, en ce sens que l'homme est l'initiateur et le gérant de la coopération. Le déclenchement se réalise au travers de la création et détection d'interférences par l'homme.

Sur les axiomes de *l'Automatisation centrée sur l'homme* introduits par Billings (91), nous remarquons que les caractéristiques de l'outil d'assistance nécessaires à la coopération dépendent à la fois du savoir-faire et du savoir-coopérer.

Du point de vue savoir-faire, un outil d'assistance doit être *prédictible*, de façon à ce que les tâches qu'il réalise puissent être prédites par des observations ou des expériences. Toujours, au niveau du savoir-faire, Gaillard (95) précise que l'outil d'assistance doit être *robuste* face à la variété des situations de travail, *stable* du point de vue de ses compétences, *résilient*, c'est-à-dire résistant face à une augmentation de la complexité du procédé. Sur le même principe, Hayes-Roth (1995) propose une architecture de Systèmes Intelligents Adaptatifs. Elle oppose ces systèmes aux agents habituels de l'Intelligence Artificielle. Pour un bon déroulement de la coopération homme-machine, les Systèmes Intelligents Adaptatifs (SIA) ont la capacité de réaliser *plusieurs tâches différentes*, de fournir *des ressources variables pour accomplir les tâches*, puis les compétences pour gérer *des conditions contextuelles complexes et variables*, de façon à ce que les critères de performance soient plus *qualitatifs*, et que la complexité du procédé soit gérée de façon *plus rapide et avec plus de robustesse*. Ce type d'assistance permet donc de détecter les problèmes, de rechercher de plus amples informations si nécessaire, d'adapter une stratégie en fonction de la situation, et de planifier les actions en fonction des contraintes de temps.

Du point de vue savoir-coopérer, l'outil d'assistance doit être *responsable* pour justifier ses analyses ou ses explications, *subordonné* pour qu'il ne prenne jamais le contrôle, sauf dans les situations prédéfinies et pour lesquelles il doit être facile à déconnecter, *dépendant* de façon à ce qu'il fasse ce que l'opérateur humain lui demande de faire, et qu'il ne fasse pas ce qui ne lui est pas demandé de faire, pour ne jamais aggraver la situation, *informatif* pour maintenir les opérateurs informés, *résistant aux erreurs* pour éviter à l'opérateur de commettre des erreurs. De

même, il doit être *adaptable* pour permettre des reconfigurations selon les préférences et les besoins de différents opérateurs humains et *flexible* pour permettre de choisir les options de contrôle et de gestion.

Les deux caractéristiques suivantes relèvent à la fois du savoir-faire et du savoir-coopérer. L'outil doit être *tolérant aux erreurs*, pour détecter et atténuer les effets des erreurs commises par l'opérateur humain. Le savoir-coopérer de l'outil doit lui permettre de détecter les erreurs par la reconnaissance de l'intention de l'opérateur, mais c'est son savoir-faire qui lui permet de reconnaître l'erreur et de la corriger. Finalement, l'outil doit être *compréhensible*, pour que son savoir-faire soit reconnu en tant que tel par l'opérateur, mais la partie savoir-coopérer doit aussi faciliter cette reconnaissance.

Karsenty & Brezillon (1995) précisent que l'outil d'assistance coopératif doit être capable non pas de présenter une solution à l'utilisateur, mais de l'aider à construire sa solution. Nous pensons que ce point de vue est trop restrictif puisqu'il se focalise exclusivement sur la forme intégrative de Schmidt. Le savoir-coopérer de l'outil ne doit pas construire une solution sur la seule base de ses connaissances, mais dans le cadre des attentes de l'opérateur humain, et ce en exploitant les connaissances dont il dispose.

Par cette tentative de classification en terme de savoir-faire et de savoir-coopérer, il est facile de se rendre compte que la frontière entre ces deux notions n'est pas toujours très nette. La formation ou l'entraînement des opérateurs humains à utiliser les outils d'assistance doit être en partie un point déterminant dans la définition de cette frontière. *Plus un opérateur a la maîtrise d'un outil d'assistance, plus la partie savoir-coopérer de cet outil se transforme en savoir-faire.* Ce phénomène se retrouve entre deux opérateurs humains qui travaillent ensemble. S'ils ne se connaissent pas de nombreux échanges verbaux, ou autres sont nécessaires à la mise en place d'un référentiel commun et d'une confiance mutuelle sur ce que chacun va réaliser, sur le suivi de la réalisation. Une fois que les opérateurs ont une meilleure connaissance du savoir-faire de l'autre, grâce au savoir-coopérer, alors il doit se produire une disparition d'une partie du savoir-coopérer en faveur d'une modification du savoir-faire. L'importance de la formation et de l'entraînement des opérateurs a déjà été relevée. Amalberti (96) l'a noté dans le cadre de la prévention de l'erreur humaine, ainsi que Muir (87) pour l'utilisation à bon escient des outils d'assistance.

Ce paragraphe a souligné l'asymétrie de la coopération homme-machine. Celle-ci varie en fonction du savoir-faire et du savoir-coopérer des outils d'assistance. Le paragraphe suivant montre l'influence de ces notions sur le choix d'une structure coopérative, principal objet de recherche des Sciences de l'Ingénieur.

3.3. Structures de la coopération

Une autre façon de présenter la coopération est de la confronter à l'organisation hiérarchique des agents, à savoir l'organisation en fonction de l'ordre de priorité sur la prise de décision. Millot (1988) classe les structures de coopération homme-machine selon deux structures génériques verticale et horizontale. De leur combinaison peuvent dériver plusieurs autres structures, notamment celles de Clarke (1996). Celui-ci présente en effet quatre structures coopératives, les différences portant sur la dépendance entre les niveaux hiérarchiques. Il distingue :

- *la coopération horizontale*, où chaque expert du groupe coopératif peut décider de la solution d'un problème sans tenir compte des autres experts,
- *la coopération en arbre*, où un expert principal dépend d'experts de plus bas niveaux pour prendre ses décisions,
- *la coopération récursive*, où différents experts dépendent les uns des autres pour prendre une décision,
- *la coopération hybride*, horizontale et à un certain niveau en arbre ou récursive, ou l'inverse.

Les paragraphes suivants détaillent les structures horizontales et verticales en insistant sur l'importance de la place du savoir-faire et du savoir-coopérer.

3.3.1. Structure verticale pour la coopération

La structure verticale implique deux agents n'intervenant pas aux mêmes niveaux hiérarchiques. Tous deux sont capables d'établir des stratégies de prise de décision, mais un seul agent décide de la stratégie à adopter et de la mettre en œuvre. L'outil d'assistance dispose d'un savoir-faire différent de celui de l'opérateur humain, ou d'une sous-partie. Ainsi, la coopération verticale appliquée au système homme-machine consiste à assister l'opérateur dans ses décisions par un système d'aide (cf. figure I-7). Ce dernier est donc de type surveillant, selon les modes d'intégration de Finin et Klein (87).

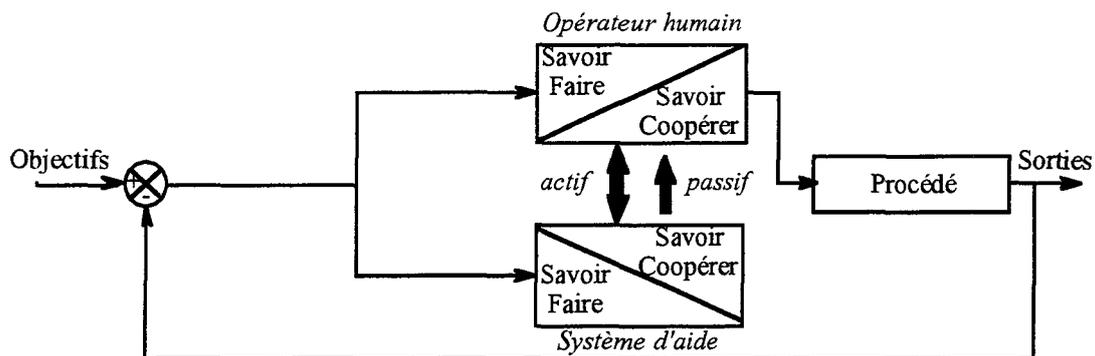


Figure I-7 : Structure verticale

Deux types de coopération verticale sont envisageables et répondent à des situations différentes (Gandibleux, 93) :

- *La coopération verticale active*, où la prise de décision est commune aux deux décideurs car construite étape par étape. Le cheminement du raisonnement de l'outil d'assistance doit donc être adapté à celui de l'opérateur humain. Si les savoir-faire sont différents alors ce type de structure permet la forme intégrative de Schmidt, sinon, il favorise la forme confrontative.
- *La coopération verticale passive*, où le système est capable d'élaborer lui-même une solution. La solution finale est communiquée à l'opérateur humain qui décide de la mettre en œuvre ou non. Le système doit être capable de trouver une solution répondant aux contraintes du procédé et de la situation, et, au besoin de la justifier. Si les savoir-faire sont différents alors ce type de coopération est à rapprocher de la forme intégrative de Schmidt, sinon, il se rapproche de la forme augmentative.

Ces deux types de coopération se distinguent par le savoir-coopérer qui est limité dans le second cas. Cette démarche peut répondre à une urgence dans la prise de décision, plutôt qu'à une recherche de solution optimale.

3.3.2. Structure horizontale pour la coopération

Sur la structure horizontale les deux agents interviennent sur l'ensemble des activités, de la perception, à la prise de décision et action. Les savoir-faire sont considérés identiques. Cette structure est à rapprocher de la forme augmentative de Schmidt. Appliquée au système homme-machine, la structure horizontale consiste à assister l'opérateur par un système automatisé de type agent. L'ensemble des tâches à réaliser est réparti de façon dynamique entre l'opérateur humain et l'outil d'assistance selon des critères de performance ou de charge de travail.

C'est dans cette structure de coopération que s'inscrit la problématique de répartition dynamique de tâches. Le pilotage de la répartition s'effectue en fonction des informations issues du procédé, du système d'aide et de l'opérateur humain. Le détail de cette organisation est présenté dans la partie ci-après.

Une fois les tâches partageables déterminées, le répartiteur peut assurer son rôle. Cette fonction de répartition peut être tenue, soit par l'opérateur humain lui-même, soit par le système d'aide, donnant lieu respectivement au mode *explicite*, et au mode *implicite* (Rieger, 82). Dans cette structure coopérative, l'importance du savoir-faire et du savoir-coopérer sont fonctions du mode utilisé.

3.3.2.1. Mode explicite

Dans ce mode, le pilotage de l'allocateur de tâches est assuré par l'opérateur humain (cf. figure I-8). Lorsqu'une tâche partageable apparaît, l'opérateur humain décide de l'affectation de cette tâche, soit au système d'aide, soit à lui-même. La décision d'affectation de l'opérateur humain, c'est-à-dire sa capacité à gérer les interférences, est surtout fonction de la connaissance du modèle qu'il possède sur le savoir-faire du système d'aide. Cependant, lorsque la tâche réalisée par le système interagit avec les tâches réalisées par l'opérateur humain alors le système d'aide doit disposer de savoir-coopérer.

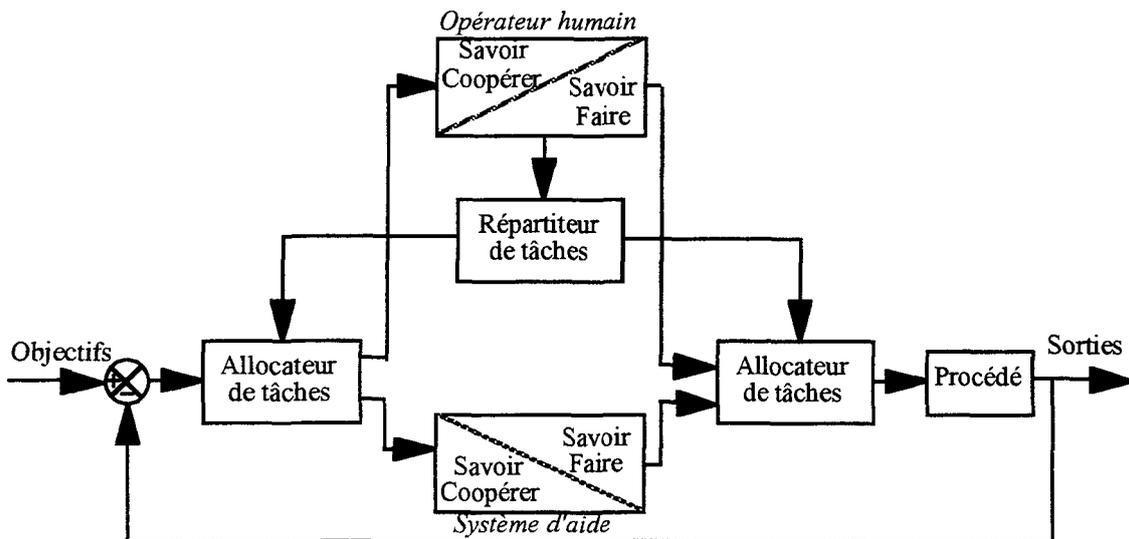


Figure I-8 : Mode explicite

La tâche de gestion de la répartition des tâches qui consiste à choisir et à réaliser l'affectation induit une charge supplémentaire qui doit être compensée par les apports des outils d'assistance, ainsi que par l'apport d'informations facilitant le choix de répartition. Le répartiteur s'appuie sur le savoir-faire du système d'aide pour déterminer les tâches pouvant être réparties. L'allocateur se base sur le savoir-coopérer de l'opérateur humain et du système d'aide pour définir l'allocation.

3.3.2.2. Mode implicite

Le pilotage du répartiteur de tâches est assuré cette fois de façon automatique (cf. figure I9). Lorsqu'une tâche partageable apparaît, le calculateur l'affecte soit à l'opérateur humain, soit au système d'aide, selon une certaine politique et différents critères, comme le maintien de la charge de travail de l'opérateur humain entre deux seuils minimum et maximum. Les critères sont donc à la fois fonctions du savoir-faire et du savoir-coopérer.

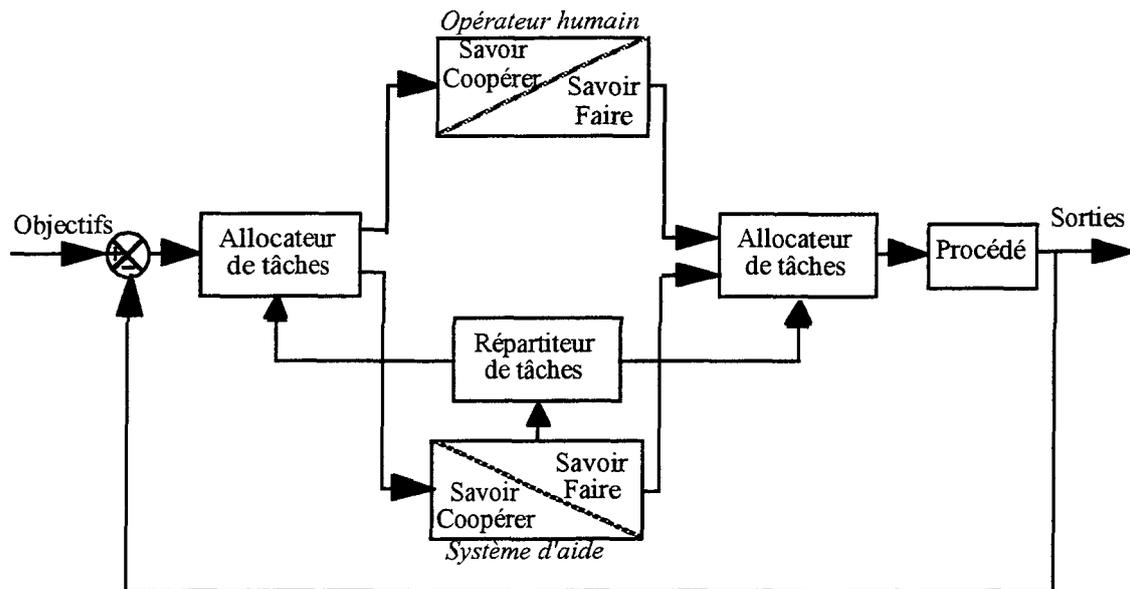


Figure I-9 : Mode implicite

Le mode implicite peut être préemptif ou non. Une répartition dynamique implicite est dite préemptive, si une tâche allouée à l'un des agents peut être réallouée à l'autre agent. Si la préemption apporte une certaine souplesse dans la commande de l'allocateur, elle peut conduire à des problèmes ergonomiques sur lesquels nous reviendrons.

4. Principes de la répartition dynamique de tâches

4.1. Structure de la répartition dynamique de tâches

4.1.1. Le répartiteur

Pour répondre aux principes de répartition, le répartiteur définit tout d'abord les tâches pouvant être allouées soit à l'opérateur humain, soit au système d'aide. Ces tâches sont appelées *tâches partageables* (Milot, 88). Elles consistent en un sous-ensemble des tâches réalisables par chacun des agents. La possibilité de réalisation de ces tâches dépend des compétences intrinsèques des agents, c'est-à-dire leur savoir-faire.

Plusieurs caractéristiques de l'opérateur humain ont été présentées au cours des paragraphes précédents. Dans le cadre de la répartition dynamique de tâches, le savoir-faire de l'opérateur humain permet a priori de traiter toutes les tâches. Cependant, dans certaines situations où le nombre de tâches devient trop important, l'opérateur humain peut être dans l'incapacité de contrôler l'ensemble du procédé, à cause de ses capacités limitées. La répartition dynamique cherche à éviter ces problèmes en apportant en plus d'une aide à la décision, une aide à l'action.

Le répartiteur s'appuie sur le savoir-faire et le savoir-coopérer du système d'aide et de l'opérateur humain pour définir les tâches partageables. Le savoir-faire du système d'aide est lié à la connaissance du procédé obtenue par une décomposition et une analyse des tâches à exécuter sur le procédé. Le séquençage et les dépendances des tâches résultent de l'analyse faite sur le savoir-coopérer qui permet au répartiteur de définir la partageabilité d'une tâche. Ainsi, deux tâches fortement dépendantes, dont l'une ressort uniquement de la compétence humaine, ne peut être complètement partageable. Debernard (1993) parle alors d'*incomplétude statique de la partageabilité*. La capacité d'un système d'aide est liée aussi à la dynamique du procédé. Malgré l'avancée des nouvelles technologies, certaines situations dynamiques et complexes peuvent

rendre une tâche a priori partageable, non partageable. Debernard parle alors d'*incomplétude dynamique de la partageabilité*.

Ce principe de répartition n'est applicable que s'il est possible d'extraire une décomposition de tâches. Elle présente une hiérarchie de tâches et de sous-tâches. Qu'elles se rapportent aux notions de but, d'activités, de fonctions, la décomposition doit être compatible avec les tâches propres à l'activité de l'opérateur humain, et avec ce qu'il est possible d'automatiser. Cet objectif est très difficile à atteindre, car en deçà de l'aspect technologique, il est nécessaire de considérer la notion de plan de gestion d'ensemble de la tâche que peut avoir l'opérateur humain. Cependant, il est aussi difficile de le connaître, et donc de le respecter pour définir les tâches partageables.

4.1.2. L'allocateur

L'allocateur assure l'interface entre le répartiteur et les agents, d'une part en apportant l'information entre les agents et le procédé, et d'autre part par le contrôle des commandes. Dans son rôle de contrôleur, l'allocateur vérifie la mise en œuvre des tâches allouées. Dans son rôle informationnel, l'allocateur prévient les agents de l'affectation des tâches, des consignes à respecter quant à l'action à réaliser, renforcées d'informations relatives à l'état du procédé.

Alors que le répartiteur considère les deux agents comme des entités indépendantes, l'allocateur gère les problèmes de communication entre les deux agents, par la mise en adéquation des savoir-coopérer des agents. Debernard (1993) classe les conflits en deux catégories, les conflits de coordination, les conflits décisionnels. Les premiers se produisent lorsque l'un des deux agents tente de s'allouer une tâche allouée à l'autre. Ce type de conflit peut se produire de manière directe, en changeant l'allocation, ou de manière indirecte, par une action détournée. Le conflit décisionnel, quant à lui, peut apparaître sous deux formes. Il est stratégique, lorsque le conflit provient d'un désaccord sur la répartition; il est tactique lorsqu'il provient d'un désaccord sur les actions à mettre en œuvre. Dans les systèmes homme-machine les conflits sont soulevés par les opérateurs humains qui soulignent alors les incompétences du système d'aide ou un manque de formation.

L'apparition de ces conflits dépend du mode de répartition appliquée. Selon l'importance et la nécessité, la fonction de répartition sera soit confiée à l'opérateur humain, soit à un calculateur. Dans le mode de répartition explicite, les conflits pouvant apparaître sont décisionnels tactiques. L'opérateur humain peut en effet contester l'action préparée par le système d'aide.

Dans le mode de répartition implicite, des conflits de coordination et décisionnels peuvent apparaître. Seul l'apport d'une interface homme-machine correcte, notamment par la qualité des informations présentées (type et forme de l'information), peut prévenir de ces conflits, en justifiant les raisons de l'affectation réalisée. Comme nous l'avons vu avant, ceci suppose que l'opérateur humain ait suivi une formation qui lui permette de connaître la structure complète du système homme-machine, tant le système d'aide que le répartiteur de tâches.

4.2.Synthèses des études sur la répartition dynamique de tâches

Le partage de tâches peut se concevoir selon deux points de vue (Delsart, 95) :

- en fonction des représentations internes manipulées par l'opérateur humain, regroupement de sous-parties du procédé,
- en fonction des modes de traitements, de gestion de la prise d'information, de prises de décision propres à l'opérateur humain.

Dans le premier cas, si le partage se fait entre un opérateur humain et un système d'aide, il faut veiller à ce que l'opérateur humain, ne contrôlant qu'une partie du système, ne perde pas la

maîtrise de la situation. Le savoir-coopérer du système d'aide doit favoriser l'entretien de la maîtrise de la situation par l'opérateur.

Dans le second cas, la répartition de tâches est difficilement applicable. C'est pourquoi, l'auteur préconise *une répartition en polyvalence* (augmentatif ou confrontatif) par opposition à *une répartition en spécialisation* (intégratif) où chacun réaliserait des activités différentes.

Il est indispensable que l'opérateur connaisse les compétences et capacités du système d'aide, c'est-à-dire son savoir-faire, mais également les principes de la répartition de tâches, ses objectifs, facteurs de motivation, et les critères de répartition de tâches, c'est-à-dire son savoir-coopérer, indispensable pour qu'il puisse positionner ses actions en fonction de celles du système automatisé. En effet, en comparant deux équipes sur une activité de répartition, Samurçay et Rogalski (1993) ont montré que les stratégies d'organisation diffèrent et qu'elles ont des répercussions importantes sur leur efficacité. En effet, l'une des équipes, avait défini *cette répartition explicitement et avant exécution*, ce qui permettait un filtrage approprié des informations et des traitements parallèles. Dans l'autre équipe aucune activité de répartition n'était apparue, ce qui conduisait à de moins bonnes performances.

Les principales caractéristiques manipulées dans la construction d'une répartition dynamique de tâches sont essentiellement basées sur les types de procédés contrôlés (Crévits, 96). Older (97) propose une approche qui intègre davantage de facteurs humains. Il prend en effet plus de précautions quant à la qualité du travail de l'opérateur humain. Il présente les points nécessaires à la mise en place d'une allocation de tâches, ainsi que plusieurs critères qui permettent de décider l'allocation. Ces éléments sont fortement liés aux caractéristiques de coopération que nous avons présentées au début de ce chapitre.

5. Conclusion

Ce premier chapitre avait pour objectif de présenter la problématique de la coopération homme-machine. Après en avoir démontré la nécessité, nous avons souligné les manques actuels en terme de prise en compte des facteurs humains dans la conception des outils d'assistance. Afin, de mieux cerner ces manques, une définition de la coopération a été proposée. Deux notions ont notamment été distinguées, le savoir-faire et le savoir-coopérer. Les recherches actuelles ont surtout porté sur le savoir-faire des outils d'assistance. Mais celui-ci ne suffit pas pour assurer une bonne coopération entre l'opérateur humain et la machine. Nous proposons donc d'approfondir les recherches sur le savoir-coopérer. Une définition du savoir-coopérer est donnée, ainsi que plusieurs illustrations. Les notions de savoir-faire et de savoir-coopérer sont maintenant analysées dans le cadre de l'étude d'une forme de coopération, la Répartition Dynamique de Tâches.

Les chapitres suivants appliquent les principes de coopération présentés ci-dessus au domaine d'application particulier qu'est le Contrôle de Trafic Aérien.

Chapitre II

Coopération Hommes-Machines Multiniveau : exemple du contrôle de trafic aérien

1. Introduction

Le premier chapitre a donné une synthèse des recherches menées sur la supervision et le contrôle des procédés complexes. Il a montré que pour le bon fonctionnement de ce type de procédé l'homme reste indispensable. Le Contrôle de Trafic Aérien est un exemple de procédés complexes dont la sécurité et la performance du procédé ne sont aujourd'hui garanties que par la présence des contrôleurs aériens. Ce deuxième chapitre met en évidence qu'il ne suffit pas pour un agent de disposer d'un savoir-faire pour mener à bien une activité collective, mais qu'il est nécessaire d'élaborer un savoir-coopérer. Il est indispensable à la coopération entre deux agents humains, mais aussi entre un agent humain et un agent artificiel.

Ce chapitre propose donc une application pratique des notions et principes exposés dans le chapitre précédent. A la suite de cette introduction, la deuxième partie donne une description détaillée du contrôle de trafic aérien. Elle est nécessaire car de nombreuses analyses s'y attachent, qu'elles portent sur la performance propre du procédé (connaissance du réseau aérien), sur les supports techniques (connaissance sur les outils de contrôle), sur l'activité des opérateurs (connaissance sur les tâches de contrôle).

La troisième partie de ce chapitre présente la première expérimentation ayant appliqué la répartition dynamique de tâches au contrôle aérien, SPECTRA V1 (Système de Partage de tâches Expérimental pour le Contrôle de TRafic Aérien, Version 1). Elle intègre l'outil d'assistance SAINTEX (Système de contrôle AutomatIque de NuiT EXpérimental) qui est alors expliqué.

L'analyse des résultats issus de SPECTRA V1 nous conduit à définir un nouveau principe de coopération, la coopération multiniveau. La quatrième partie a donc pour objectif la définition de la coopération multiniveau. C'est dans ce cadre que la répartition dynamique de tâches est redéfinie en terme de structures et de mécanismes basés sur le savoir-faire et le savoir-coopérer.

La coopération multiniveau est appliquée au contrôle de trafic aérien au cours de la cinquième partie de ce chapitre, la sixième et dernière partie apportant une conclusion.

2. Le contrôle de trafic aérien

Le contrôle aérien doit aujourd'hui faire face à plus de cinq pour cent d'augmentation de trafic par an (Berger, 95). A cette augmentation, les services de la navigation aérienne doivent répondre en continuant à assurer la fluidité du trafic, et surtout sa sécurité. Cette partie présente l'organisation du contrôle de trafic aérien, ainsi que les nombreuses technologies mises en œuvre.

2.1. Le contrôle en route

L'écoulement du trafic aérien est assuré par deux types d'organismes : les Centres de Contrôles Régionaux (CCR) et les tours de contrôle d'aérodromes. Les tours assurent les décollages, l'"approche" des terrains, les atterrissages et les mouvements au sol. Les études présentées ici concernent le contrôle "en route" réalisé par les CCR.

Les CCR prennent en charge les avions tout au long de leur vol. Un centre donné a donc la responsabilité d'un avion dans sa région géographique. La France est divisée en cinq régions sous le contrôle des centres d'Athis-Mons (Orly), de Reims, de Brest, de Bordeaux, d'Aix en Provence (cf. figure II-1).

Chaque centre contrôle un ensemble de secteurs (délimité par les traits gras). Cet ensemble de secteurs peut être divisé en plusieurs secteurs selon la charge de trafic (délimité par les traits fins).

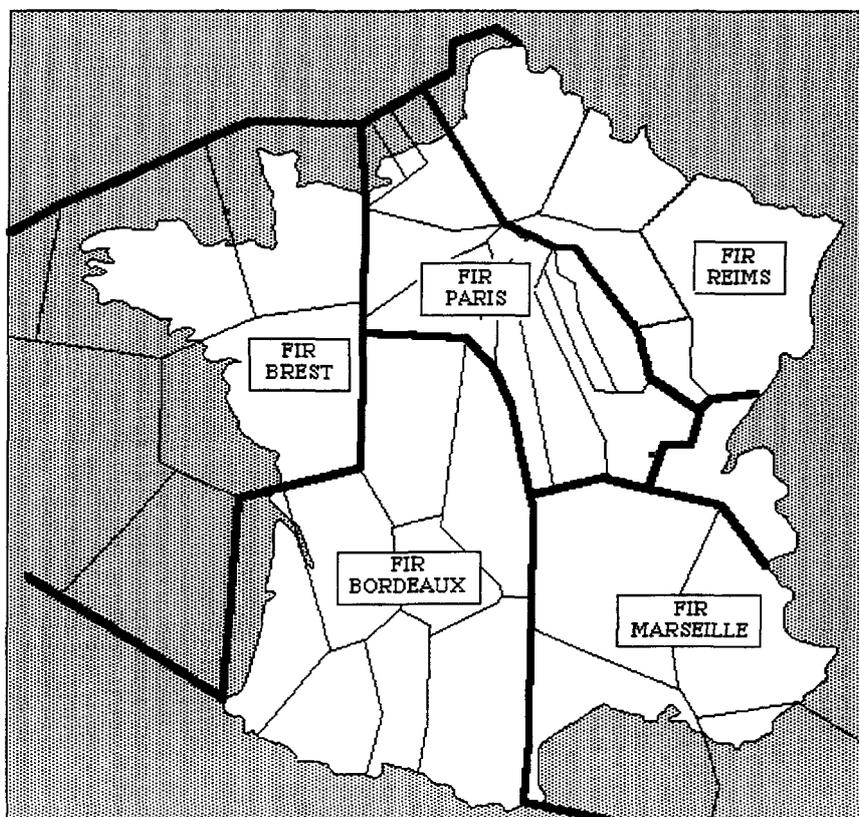


Figure II-1 : Organisation de l'espace aérien français.

Il existe deux régimes de vols possibles : le "vol à vue" et le "vol aux instruments". C'est ce dernier qui concerne nos travaux. Dans le cas du vol aux instruments, c'est le contrôle au sol (et non pas le pilote) qui prend la responsabilité d'un aspect capital de la sécurité appelé l'"anticollision".

Le but essentiel du contrôleur répond à deux impératifs : éviter les abordages entre appareils, et assurer l'écoulement du trafic selon les horaires prévus. Mais pour atteindre ces buts, une planification à long terme ne suffit pas. Tout pilote dépose à l'avance *un plan de vol* qui définit, en particulier, une heure de départ, un trajet, un niveau de croisière souhaité. Le contrôle n'agit pas a priori sur ces données. Elles sont à respecter autant que faire se peut. Normalement, un pilote applique son plan de vol en informant régulièrement le contrôleur de son évolution. Le

contrôleur surveille et ne peut modifier le vol d'un avion que s'il a détecté une situation dangereuse. De nombreux facteurs contribuent à perturber les plans de vol et à modifier les prévisions, en particulier les conditions météorologiques. Ainsi, le contrôle fin, la véritable anticollision ne peut guère se faire qu'à très court terme, d'environ dix minutes à l'avance (Bisseret, 95).

L'espace aérien est organisé selon deux entités un plan horizontal décrit par les "balises" et un axe vertical décomposé en niveaux de vol.

Les balises définissent dans le plan horizontal un réseau de routes aériennes prédéfinies grâce à un ensemble de moyens radioélectriques implantés sur le territoire (cf. figure II-2).

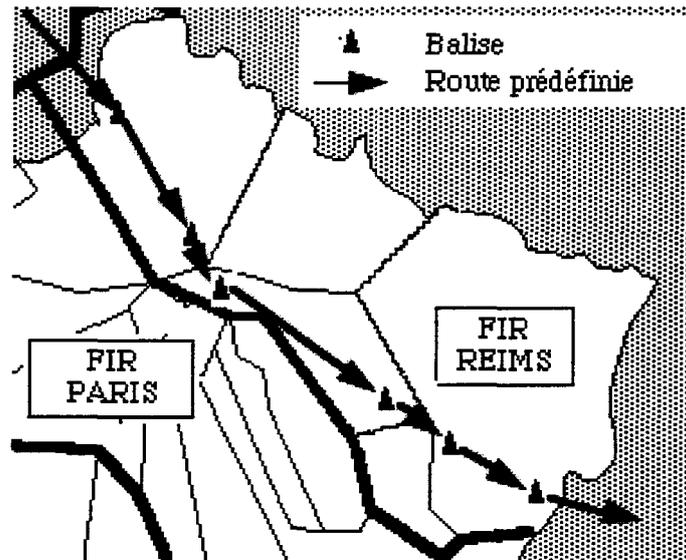


Figure II-2 : Découpe horizontale de l'espace aérien

Les niveaux de vol sont échelonnés de 10 en 10 jusqu'au niveau 290 (niveau 60, 70, ..., 240, ..., 290), soit 1000 pieds de différence (environ 300 mètres), et de 20 en 20 au-delà de 290 (cf. figure II-3).

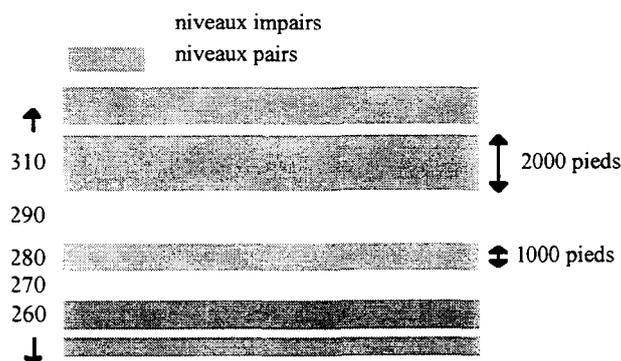


Figure II-3 : Découpe verticale de l'espace aérien

De plus, un niveau de vol est dédié à un sens de vol. Il existe deux types de niveaux : les niveaux dits "pairs" pour un sens de vol (ex.: Nord-Sud), et pour l'autre sens les niveaux dits "impairs" (ex.: Sud-Nord). Le niveau 280 est pair, le niveau 290 est impair, puis le niveau 310 est pair.... Ainsi, deux avions sur une même route, dans des sens opposés (face à face), sont

au moins distants de 1000 pieds. Le réseau aérien est tissé à partir de ces routes de façon à réduire le nombre de conflits potentiels.

2.2. Organisation du système de contrôle en route

Le système de contrôle est principalement composé de deux entités, le système CAUTRA (Coordonateur AUtomatisé du contrôle de TRafic Aérien), et plusieurs positions de contrôle (cf. figure II-5). Le système CAUTRA dispose en entrée des plans de vol déposés par les compagnies, actualisés par les informations temps réel fournies par les radar primaire et secondaire (cf. tableau II-1). Le traitement de ces données constitue la source d'information des positions de contrôle, en générant les plans de vol sur bande papier et en affichant les positions des vols sur les écrans radar.

Chaque secteur est normalement contrôlé par deux opérateurs, un contrôleur organique et un contrôleur radar, tous deux ayant suivi la même formation. Ils travaillent sur une position de contrôle, et chaque position de contrôle dispose d'une fréquence propre pour communiquer avec les aéronefs.

<i>Niveau de gestion</i>	<i>Fonction</i>	<i>Information manipulée</i>	<i>Destinataire de l'information</i>
National	Traitement des plans de vol Définition des centres impliqués	Plans de vol nationaux	Centres de contrôle
Régional	Gestion des transitions entre centres Définition des secteurs impliqués	Plans de vol relatifs au centre	Chef de salle
Secteur	Gestion des transitions entre secteurs	Strips	Contrôleur organique
	Définition des contraintes du trafic Gestion des avions	Informations radar	Contrôleur radar

Tableau II-1 : Niveaux de gestion du trafic aérien par le système CAUTRA (Crévits, 96)

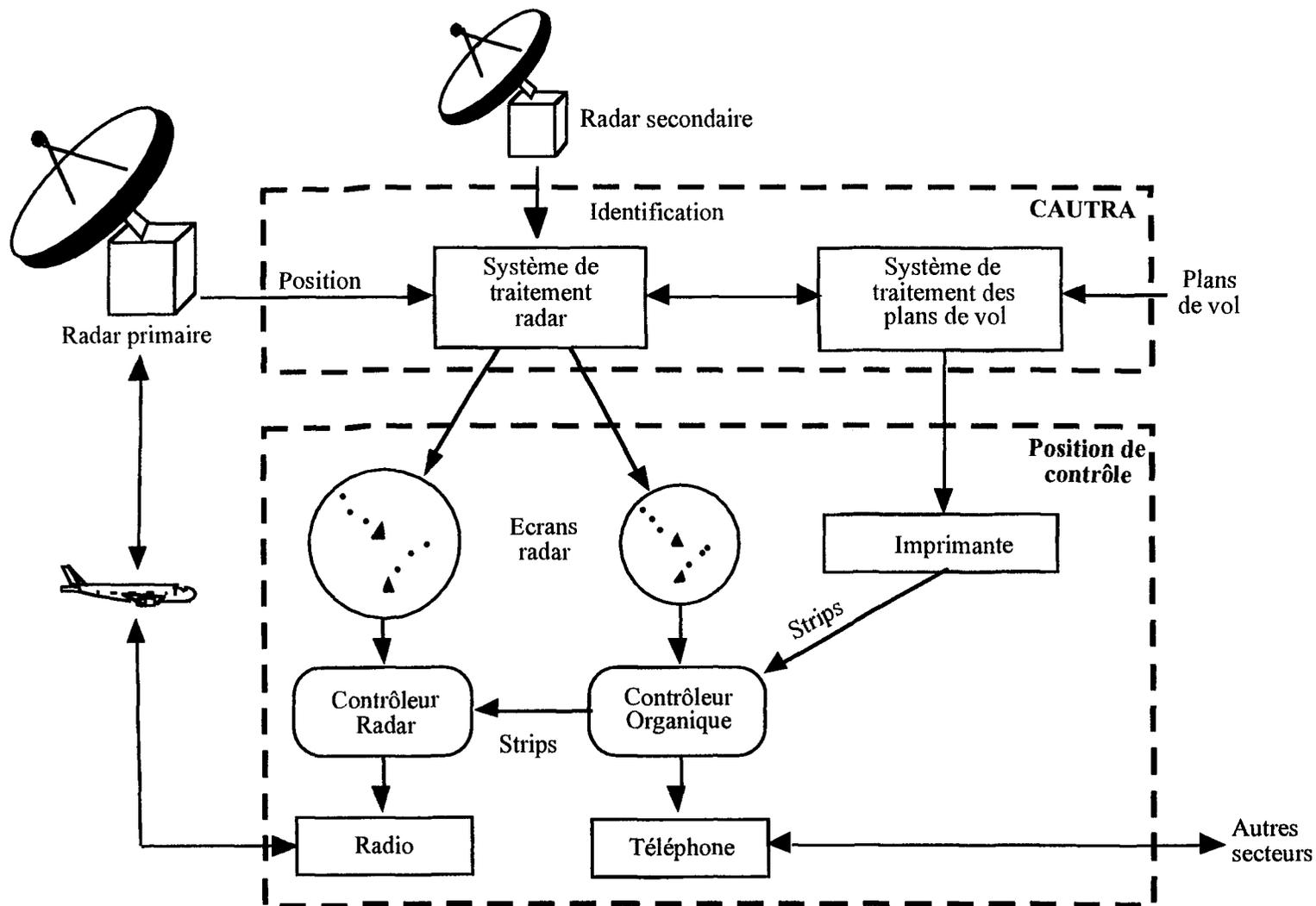
2.3. Description d'une position de contrôle

La division en sous-secteurs entraîne une tâche dite de coordination entre secteurs. Cette tâche est tenue par le contrôleur organique. Une dizaine de minutes avant qu'un avion quitte le secteur, le contrôleur propose l'avion à son collègue du secteur suivant. Le contrôleur recevant peut, compte-tenu des avions qu'il a déjà, accepter ou négocier les conditions d'entrée (généralement par changement de niveau de vol). Lorsque l'avion s'apprête à sortir du secteur, le contrôleur précédent demande au pilote de prendre la fréquence du secteur suivant. Cependant, la coordination est souvent implicite. Les négociations entre les contrôleurs organiques n'apparaissent généralement qu'en cas de problème.

INDICATIF	EFL	Balise	Balise	Balise	Balise	CAP
TYPE	TFL					TAUX
DEP ARRIV						VI-MACH
RFL	CFL	heure	heure	heure	heure	VI-NOEUD

Figure II-4 : Un strip.

Figure II-5 : Moyens techniques d'une position de contrôle



Dans un secteur, un vol est défini par les indications fournies sur le strip (cf. figure II-4), qui est actuellement une bande papier. Il indique pour chaque vol :

- la route suivie, c'est-à-dire la succession des balises survolées par l'avion (balise d'entrée, de sortie, balises intermédiaires),
- les heures "estimées" de passage sur ces balises (très imprécises),
- le (les) niveau(x) de vol utilisé(s) :
 - niveau demandé (RFL : requested flight level),
 - niveau ordonné par le contrôleur (CFL : clear flight level),
 - niveau d'entrée (EFL : entry flight level),
 - niveau de sortie (TFL : transfert flight level).

Le contrôleur dispose de plus :

- du type de l'appareil dont il connaît les performances (vitesse de croisière et taux de montée, de descente),
- du terrain de départ et du terrain de destination codé en quatre lettres (LFPO pour Orly, EGLL pour Londres par exemple)
- de l'indicatif du vol (son nom) sous la forme de lettres et de chiffres (AFR490 pour Air France 490, DLH310 pour Lufthansa 310 ...)

Ces informations sont ensuite affinées par les pilotes, qui communiquent par radio aux contrôleurs, un message de position. Ce message rappelle l'indicatif de l'appareil, la balise survolée, l'heure de ce survol, la balise prochaine et l'heure estimée de passage sur cette future balise, ainsi que son niveau de vol.

Les strips sont disposés horizontalement les uns sous les autres, constituant un tableau qui résume à chaque instant les caractéristiques de la situation de trafic dans le secteur. Généralement, à chaque partie du tableau de strips correspond une zone géographique du secteur contrôlé. Ces caractéristiques sont la direction de l'évolution de l'avion, la parité de son niveau de vol, son état conflictuel ou non. Les informations les plus importantes sont soulignées, entourées, ou modifiées par les contrôleurs au crayon.

Les contrôleurs disposent, en supplément de ce tableau de strips, d'un écran radar qui dessine les symboles des avions, sur le secteur contrôlé, suivant leur position géographique. Grâce à l'enregistrement des plans de vol déposés et des transpondeurs embarqués sur chaque appareil, chaque avion est représenté par un plot et une étiquette indiquant son indicatif, son niveau de vol actuel, sa vitesse et sa tendance d'évolution. Trois positions antérieures à la position courante sont également affichées, et marquent ainsi la direction de l'avion.

L'ensemble de ces informations doit permettre aux contrôleurs de détecter les avions en conflit. Deux avions sont considérés conflictuels si leur distance de séparation est inférieure à 8 milles nautiques (MN). Mais la détection s'intègre au sein de l'activité générale de contrôle qui est maintenant détaillée.

2.4. Présentation détaillée des tâches de contrôle

L'analyse de l'activité des contrôleurs présentée dans ce paragraphe provient principalement des résultats obtenus par les travaux de Bisseret et présenté dans (Bisseret, 95). Le vocabulaire utilisé par les contrôleurs est présenté. Il constitue une indication précieuse pour l'exploitation des résultats expérimentaux que nous présenterons dans les chapitres suivants, notamment les verbalisations des contrôleurs pendant une tâche, appelées les protocoles verbaux.

Chez les contrôleurs, la procédure de diagnostic est déclenchée par deux événements :

- un nouvel avion proposé (explicitement par un secteur adjacent) pour entrer dans le secteur du contrôleur,
- un avion déjà sous leur contrôle et demandant un changement de niveau de vol (demande explicite du pilote ou décision du contrôleur).

Les contrôleurs classent les avions en fonction des conflits qu'ils ont détectés. Ils définissent les conflits en fonction du type d'intervention qu'ils vont exécuter :

- "intervention minimale sur le déroulement des vols" qui incite le contrôleur à attendre et à surveiller l'évolution du couple d'avions lorsqu'il ne sait pas établir un diagnostic sûr,
- décision d'action sans être certain qu'il y ait conflit, mais qui assure la "sécurité maximale".

Pour la résolution de conflit, le contrôleur dispose de quatre grands types de solution :

- *Action sur le niveau de vol* :
 - changer (définitivement) de niveau,
 - stabiliser à un niveau intermédiaire.
- *Action sur le cap* :
 - supprimer la convergence (par "mise en caps parallèles" ou "cap direct"),
 - éloigner le point de convergence,
 - rapprocher le point de convergence,
 - faire passer un avion derrière l'autre (i.e. "viser un avion avec l'autre"), puis alignement, puis croisement.
- *Modification de valeur d'un paramètre de performance* :
 - modifier la vitesse,
 - modifier le taux de montée ou de descente.
- *Passage à vue par le pilote*, le contrôleur demande au pilote de décider et d'appliquer la manœuvre d'évitement.

Les modalités de décision par ordre de précaution sont :

- "*Laisser aller*" : le contrôleur laisse évoluer les avions suivant le plan de vol. Cette modalité correspond au diagnostic de *non-conflit certain*, c'est-à-dire qu'a priori si les pilotes respectent leur plan de vol, il n'y a pas de risque de conflit. C'est pour s'en assurer que le contrôleur :
 - demande aux pilotes de rappeler après passage du niveau qui pourrait poser problème, ce qui permet au contrôleur de voir son attention attirée lorsque le croisement a eu lieu (clôture du problème),
 - donne une information de trafic (le contrôleur signale l'avion pouvant poser problème au pilote).

- *Laisser aller* mais avec prévision d'une intervention éventuelle : contrairement au premier cas, il y a alors surveillance de l'évolution de la situation et choix d'une intervention. Elle peut être assortie d'une demande de report (i.e. signaler son passage) à un niveau :
 - *après* le niveau de conflit (clôture du problème),
 - *avant* le niveau de conflit (réserve la possibilité d'action au dernier moment).
- *Première intervention* puis laisser évoluer avec prévision d'intervention complémentaire éventuelle : la première intervention n'est pas décisive et tend uniquement à améliorer la situation, mais sans assurer avec certitude la résolution du conflit (ex. : réduction de vitesse, de taux de montée ...).
- *Autorisation de sécurité* avec prévision d'intervention éventuelle : le contrôleur limite la montée ou la descente de l'avion à un niveau avant le niveau de conflit. Cela lui permet de surveiller le rapprochement, mais tout en étant certain que, s'il était distrait par autre chose au moment de l'examen ultime du problème, au pire l'avion est stabilisé et ne peut pas franchir le niveau de vol de l'avion avec lequel il est en conflit.
- *Décision certaine d'intervention* : il faut distinguer le changement de niveau qui clôt le problème d'emblée, du changement de cap qui oblige le plus souvent à une surveillance, jusqu'au moment où les avions sont définitivement séparés pour les ramener à leur trajet normal.
- *Refus du problème* : cette "précaution" extrême intervient lorsqu'il est possible au contrôleur de considérer que la demande de l'avion n'est pas impérative (ex. : demande de changement de niveau de croisière par le pilote).

Les critères de choix de la solution sont essentiellement évalués en fonction de la charge de travail du contrôleur d'une part, et en fonction des contraintes pour les pilotes d'autre part. Ces deux critères peuvent être en opposition. Le contrôleur peut être amené à imposer une contrainte à un pilote à seule fin de ne pas augmenter sa charge de travail et risquer d'être débordé. D'autres critères peuvent être aussi mis en évidence :

- *Critères liés à l'infrastructure et au trafic* :
 - Existence de zone réservée active (zone militaire par ex.) :
 - soit parce qu'elle interdit une solution (ex. : changement de cap qui ferait pénétrer la zone),
 - soit parce que, pour adopter la solution, elle oblige à une coordination avec les secteurs adjacents.
 - Existence de portion d'espace à trafic dense qui peut amener le contrôleur à éviter de donner un cap vers un tel espace.
- *Critères liés à la charge induite par la solution* :
 - volume d'échanges verbaux nécessité par les différentes solutions,
 - nombre d'interlocuteurs (solution nécessitant un échange de communications avec un ou plusieurs avions),
 - utilisation de l'écran radar pour certaines résolutions : utilisation ponctuelle ou nécessité d'une surveillance plus longue du déroulement de la solution.
- *Critères liés à la charge actuelle du contrôleur* :
 - quantité d'avions en contrôle,
 - quantité de problèmes simultanés (et leur complexité).

- Critères liés aux contraintes pour les pilotes :

- nombre d'avions sur lesquels la solution intervient,
- importance du déroutement (ou à l'inverse possibilité de raccourci),
- mouvement ou non d'un avion "qui ne demandait rien",
- risque ou non de stabilisation en palier (interruption de montée ou descente),
- angle plus ou moins grand de changement de cap nécessaire.

La première partie de ce chapitre a présenté le domaine d'application. Une étude a déjà exploité ce domaine pour étudier le partage dynamique de tâche, SPECTRA V1. Elle n'implique que le contrôleur radar. Le partage de tâches étudié est celui effectué entre ce contrôleur et un système à base de connaissance d'aide à la résolution de conflit aérien, appelé SAINTEX. SPECTRA V1 est maintenant présentée.

3. SPECTRA V1

L'étude présentée dans cette partie concerne donc l'expérimentation de la répartition dynamique de tâches entre un opérateur, ici un contrôleur aérien, et un système d'aide à la résolution de conflits aériens SAINTEX (Debernard, 93), (Vanderhaegen, 93).

Nous pouvons dès à présent affirmer que le trafic aérien peut être assimilé à un procédé qui répond aux caractéristiques requises pour la répartition dynamique de tâches. Ce procédé est en effet *multitâche*; le nombre et le type de tâches sont liés au nombre d'avions à contrôler et à leur interaction potentielle. L'outil d'assistance tactique SAINTEX, que nous présentons ci-après, prend en charge des résolutions de conflits aériens depuis le diagnostic jusqu'à l'application de la commande (l'ordre de SAINTEX). *La charge de travail* du contrôleur *fluctue* constamment en fonction du nombre d'avions dans le secteur. Mais *la présence du contrôleur aérien est indispensable*, seul agent capable de répondre aux objectifs de contrôle que sont la sécurité, la fluidité et l'économie du trafic, en s'adaptant à ses nombreuses variations et incertitudes.

Deux parties détaillent l'application de la répartition dynamique de tâches au contrôle aérien. La première partie présente l'outil d'assistance fourni à l'opérateur, c'est-à-dire SAINTEX et le répartiteur, puis l'application des principes de répartition (cf. figure II-6). La deuxième partie présente le protocole expérimental, puis les résultats.

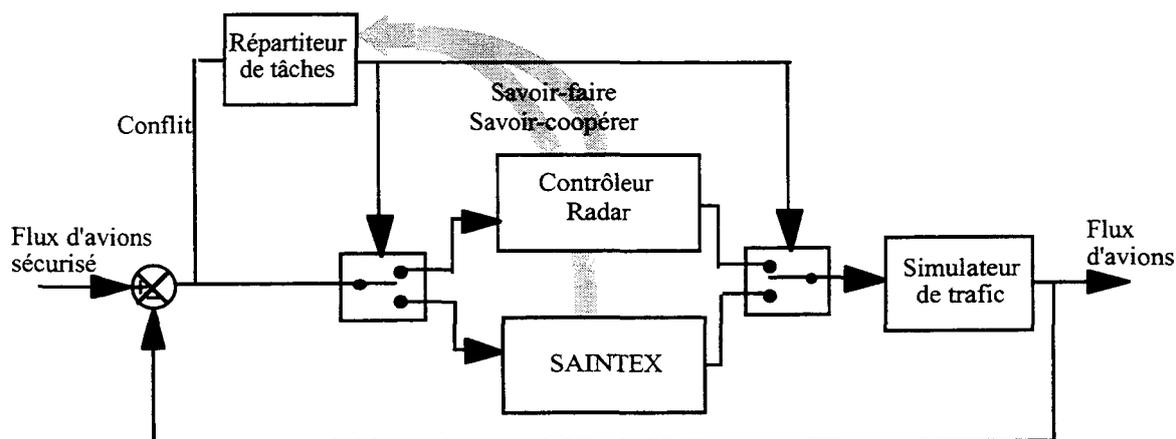


Figure II-6 : SPECTRA V1

3.1. Présentation de l'outil d'assistance SAINTEX

Notre étude s'intègre dans la construction d'une future position de travail des contrôleurs aériens. Une version de cette future position de contrôle, nommée officiellement ODS France ou encore PHIDIAS (PéripHérique Intégré de Dialogue et d'Assistance), est en cours d'implantation dans les centres de contrôle. Son objectif principal est d'augmenter la capacité du système de contrôle, tout en préservant un niveau de sécurité au moins aussi élevé que le niveau actuel (Chollet, 92). Cette position de travail est conçue de façon à pouvoir accepter l'intégration future de nouveaux outils logiciels tels que :

- MOZART (Maestro Optimisé pour les Zones d'Arrivée et de Régulation du Trafic), outil d'aide au séquençement des avions à l'arrivée des aéroports,
- ERATO (En Route Air Traffic Organiser), qui permet de clarifier une situation aérienne en identifiant les groupes d'avions interférants (filtrage) et d'assister le contrôleur en rappelant les problèmes restant à résoudre (agenda),

C'est dans le cadre de cette nouvelle position de travail, que des recherches sont menées pour développer des outils tels SPECTRA et SAINTEX.

3.1.1. L'outil d'assistance tactique SAINTEX

Le partage de tâche est réalisé entre le contrôleur radar et SAINTEX. Le contrôleur radar est capable d'effectuer toutes les tâches, mais il peut être limité par une surcharge de travail; en revanche SAINTEX est limité à certains conflits parmi les plus simples. De ce fait, les tâches partageables (intersection du savoir-faire des deux agents) sont les tâches de SAINTEX. De plus, SAINTEX ne sait extraire les intersections entre les routes aériennes (conflits) que si celles-ci sont directes (un segment et non plusieurs). C'est le cas du trafic de nuit (Mordchelles, 89). La route directe est définie par une balise d'entrée et une balise de sortie.

SAINTEX est capable de :

- prendre en compte un vol entrant dans le secteur,
- détecter les conflits entre les vols,
- mettre en œuvre la résolution de certains conflits,
- surveiller ces conflits en cours de résolution,
- remettre les vols déviés par la résolution sur leur route initiale.

Les conflits résolubles par SAINTEX sont constitués de deux avions stables en niveau de vol, dont la résolution consiste à modifier le cap de l'un des avions. Ainsi, les conflits impliquant plus de deux avions, ou comportant un avion devant changer de niveau de vol ne peuvent être résolus par le système d'aide.

Il faut donc noter que les compétences du système d'aide ne représentent qu'une sous partie de celles de l'opérateur. Le rôle de SAINTEX n'a pas pour but de rivaliser avec l'opérateur, mais de prendre en charge à certains moments quelques conflits, afin de réguler la charge de travail de l'opérateur. Les modalités de répartition sont présentées ci-après.

3.1.2. Le répartiteur

SPECTRA V1 met en place deux modes de répartition, l'explicite et l'implicite. Le répartiteur utilise les savoir-faire du contrôleur radar et de SAINTEX pour construire les tâches, mais ce sont les savoir-coopérer de ces agents qui déterminent si elles sont partageables, ainsi que leur allocation.

Les conflits pouvant être pris en charge par l'outil d'assistance apparaissent sous une couleur prédéterminée ainsi que la résolution proposée (angle de déviation et heure d'application) (Debernard, 90).

En mode explicite, le contrôleur dispose d'un bouton permettant de choisir l'affectation de ces conflits. Des couleurs rappellent le choix de l'affectation.

En mode implicite, le répartiteur décide, en temps réel, de l'affectation des tâches en fonction d'une estimation des exigences de tâches. Cette fois le contrôleur subit la répartition et ne peut agir sur les avions affectés à SAINTEX.

Le paragraphe suivant détaille les caractéristiques humaines prises en compte qui ont conduit à la mise en place de ces modes de répartition.

3.1.3. Prise en compte des caractéristiques humaines

Les caractéristiques humaines intégrées portent surtout sur la définition des tâches partageables, et sur la communication homme-machine.

Une tâche partageable consiste en la résolution d'un conflit entre deux vols. La tâche partageable doit être globale, c'est-à-dire qu'elle englobe plusieurs sous-tâches, dans notre cas c'est la prise en charge complète d'un conflit. Cette précaution est prise avec l'objectif d'éviter une surcharge de travail de l'opérateur humain qui devrait intégrer encore plus de paramètres quant à l'intervention du système d'aide. Pour les mêmes raisons, si le conflit partageable entre en interaction avec un autre vol, quel qu'il soit, il est considéré comme non partageable. De plus, la répartition dynamique est non préemptive, c'est-à-dire que l'allocation ne peut être changée et ceci pour éviter de remettre en cause les plans construits par le contrôleur.

Le savoir-coopérer de SAINTEX relève de deux précautions, à savoir :

- la détection des conflits construite par le système d'aide n'est pas systématiquement affichée, le but étant de ne pas dégrader les compétences du contrôleur,
- la résolution calculée par le système d'aide est affichée de façon à ce qu'il soit prédictible.

3.2. Résultats

Ce paragraphe présente succinctement la façon dont ont été menées les expérimentations et à quels résultats elles ont conduit (Debernard, 93).

3.2.1. Protocole expérimental

L'expérimentation a nécessité la construction de la plate-forme SPECTRA V1. Cette première version de SPECTRA simule un poste de contrôle de trafic, comportant le contrôleur aérien affecté aux tâches tactiques, principalement de surveillance de résolution de conflits aériens. C'est une position de travail proche de la position réelle, de par les outils mis à la disposition du contrôleur, ainsi que par la présentation des informations. Cependant, elle suppose l'intégration de nouvelles technologies. Celles-ci suppriment notamment l'envoi d'ordre verbal du contrôleur au pilote, l'ordre étant envoyé par l'intermédiaire de l'interface.

La plate-forme permet l'enregistrement de mesures objectives et subjectives. Les mesures objectives sont l'évaluation a posteriori de la performance dont les deux critères sont la sécurité du trafic et la consommation de carburant des aéronefs. Les mesures subjectives proviennent d'une évaluation en ligne de la charge de travail, réalisée au moyen d'une échelle graduée sur laquelle le contrôleur donnait une estimation de la difficulté ressentie, et de l'utilisation de la méthode TLX (Task Load index) (Hart, 88) (cf. annexe 2). La mise en application de cette méthode demande à ce que les sujets expriment leurs sentiments sur l'expérience en fonction de six descripteurs sémantiques, l'exigence mentale, physique, temporelle, la performance, l'effort, le stress. Ces mesures sont complétées par des questionnaires.

Le plan d'expérience testait trois situations expérimentales, une situation de référence sans aide, puis deux situations mettant respectivement en application les modes de répartition explicite et implicite; trois scénarios présentant des trafics denses et similaires étaient construits de façon à effacer l'effet de familiarisation au scénario. L'ordre de passation des expériences se déroulait suivant l'ordre croissant du degré d'automatisation, de sans aide à implicite. Les opérateurs testés étaient des contrôleurs professionnels dont neuf contrôleurs certifiés et six ingénieurs de l'aviation civile (appelés stagiaires en ce sens qu'ils ont peu d'expérience du contrôle réel en salle). Il est important de souligner tous ces critères dont nous allons constater l'impact sur la façon dont les sujets ont ressenti l'expérimentation, et sur l'interprétation des données recueillies. L'analyse de ces résultats est présentée ci-après.

3.2.2. Mesures objectives

Pour l'ensemble des contrôleurs, les modes explicite et implicite permettent d'obtenir une performance globale meilleure que dans le mode sans aide. Pour un même niveau de difficulté, les contrôleurs certifiés ont généré beaucoup moins d'alarme (c'est-à-dire de conflits non résolus) avec le mode implicite durant lequel ils disposaient de plus de temps pour superviser l'ensemble du trafic et affiner les résolutions. Les contrôleurs stagiaires obtiennent au contraire de meilleurs résultats en mode explicite. Dans ce mode, ils peuvent en effet affecter davantage de conflits à SAINTEX et ainsi assurer le contrôle du reste du trafic. Toutefois ces résultats encourageants sont nuancés par les évaluations subjectives et notamment les réponses aux questionnaires indiquées ci-après.

3.2.3. Résultats des évaluations subjectives

Les résultats montrent que la perception qu'ont les contrôleurs des situations expérimentales ne confirme pas les données portant sur la performance globale. En effet, les contrôleurs certifiés déclarent préférer le mode explicite car même si celui-ci génère une charge supplémentaire due à l'allocation de conflits, il est moins frustrant que le mode implicite qui ne permet pas la reprise de conflits affectés à SAINTEX. Cependant ils reconnaissent le mode implicite comme étant plus efficace. En d'autres termes, les contrôleurs qualifiés revendiquent la possibilité de contrôler SAINTEX, d'autant plus que ce sont eux qui sont responsable juridiquement en cas d'erreur.

Inversement, les contrôleurs stagiaires préfèrent le mode implicite puisqu'il les soulage de la tâche d'allocation de conflits.

3.3. Conclusion

L'analyse de ces résultats doit se faire en prenant quelques précautions. Il faut intégrer le fait que l'effet de familiarisation aux outils d'assistance n'a pas été effacé par l'ordre de passation des expérimentations. Les résultats semblent cependant montrer que, bien qu'efficace, la politique de répartition en mode implicite reste insuffisante. Ce mode semble provoquer une perte de la maîtrise de la situation chez le contrôleur. Ce sentiment peut provenir d'une mauvaise définition des tâches partageables ou encore d'un manque de confiance de l'opérateur envers SAINTEX.

Le manque de confiance peut apparaître à cause d'un manque de formation ou de la non reconnaissance des compétences du système. De plus, la politique de répartition en mode implicite est parfois biaisée par l'apparition imprévisible de tâches non partageables, ou par le manque de tâches partageables qui positionnent le contrôleur en état de surcharge.

Bien que le mode explicite semble plus favorable à l'opérateur, il oblige ce dernier à adopter à la fois un rôle tactique propre à la tâche concernée par son niveau fonctionnel, et un rôle relevant davantage de la planification, de la stratégie répondant à l'organisation globale du travail, dont l'allocation de tâches.

Par conséquent, le principe de répartition doit être affiné, notamment du point de vue du pilotage du répartiteur, de l'outil d'assistance et des tâches qu'il est capable de gérer.

4. Principes de la coopération multiniveau

L'étude présentée dans le paragraphe précédent consistait à étudier la répartition dynamique de tâches entre un opérateur humain et un système d'aide, les tâches partagées étant celles réalisées par le niveau tactique. Les résultats fournis par l'étude expérimentale des deux modes de répartition explicite et implicite démontrent qu'il serait souhaitable que le répartiteur soit un agent à part entière du niveau stratégique. Son savoir-faire lui donne les compétences nécessaires à la prise de décision sur la répartition de tâches, son savoir-coopérer permet de communiquer cette décision au niveau tactique. Puisque le niveau stratégique est dédié à l'anticipation, à la planification, il dispose des informations nécessaires à une régulation par anticipation de la charge de travail de l'opérateur humain du niveau tactique. Cette régulation se réalise par l'organisation des tâches, et par l'affectation des tâches partageables au système d'aide.

Une première partie présentera les différentes formes d'organisation décrites par la Sociologie, par l'Économie, mais aussi plus récemment par l'Intelligence Artificielle Distribuée. Nous distinguerons les formes d'organisation se rapprochant de la problématique de répartition dynamique de tâches, de façon à mettre en évidence différents niveaux. Ayant pris connaissance des tâches concernées par ces niveaux, nous identifierons plusieurs modes de répartition de tâches relatifs à la complexité des tâches ou à la complexité de l'organisation. La répartition dynamique de tâches anticipée répond à notre objectif et fera l'objet d'une description détaillée et conclura cette partie.

4.1. Caractéristiques d'une organisation multiniveau

De nombreux procédés complexes sont organisés autour de structures multipostes qui mettent en place plusieurs niveaux de coopération. La coopération s'exerce entre plusieurs postes ou à l'intérieur d'un même poste. Nous allons nous baser sur l'organisation multiniveau de ces postes de travail pour définir une nouvelle approche de la répartition dynamique de tâches. Cette partie propose une présentation des types d'organisation; une synthèse présentée par Le Strugeon (1995) est prise en référence pour déduire le type d'organisation approprié à notre problématique.

En sociologie, Mintzberg (1986) décrit les organisations humaines en fonction de cinq éléments :

- *le sommet stratégique* : il s'occupe de la prise de décision à un niveau global,
- *la ligne hiérarchique* : elle est formée des décideurs et coordinateurs de niveaux "locaux",
- *le centre opérationnel* : il est directement lié aux fonctions de production,
- *la technostructure* : elle a une fonction d'analyse et de standardisation,
- *les fonctions de support logistique*.

A partir de ce point de vue, nous pouvons analyser la répartition dynamique de tâches selon trois éléments de l'organisation, le sommet stratégique, le centre opérationnel et la ligne hiérarchique. Les tâches tactiques sur lesquelles portent la répartition sont considérées comme faisant parties du centre opérationnel. Le sommet stratégique dispose d'informations globales qui lui permettent de décider des stratégies, ce qui permet de supposer qu'il dispose des compétences nécessaires au pilotage du répartiteur de tâches. Nous nous rendons compte que les décideurs ou coordinateurs de la ligne hiérarchique peuvent, soit appartenir au sommet stratégique, soit au centre opérationnel. Sa composition est dépendante du domaine étudié. Dans le cadre de la répartition dynamique de tâches les éléments de la ligne hiérarchique sont les décideurs finaux de l'affectation des tâches. C'est donc l'appartenance de ce décideur à l'un des niveaux fonctionnels qui définit le mode de répartition.

Fox (1981) note que la possibilité de répartition de tâches est fonction du degré de centralisation de l'organisation; en effet, il souligne que la complexité des informations, des tâches ou de la coordination conduit à une distribution de tâches. Inversement, l'incertitude, c'est-à-dire le manque d'information, mène à l'agrégation de tâches (cf. figure II-7).

Ces propriétés constituent des critères de répartition de tâches. En effet, plus le système est incertain, moins il est aisé de prévoir les tâches à réaliser et donc de prédire les tâches à partager.

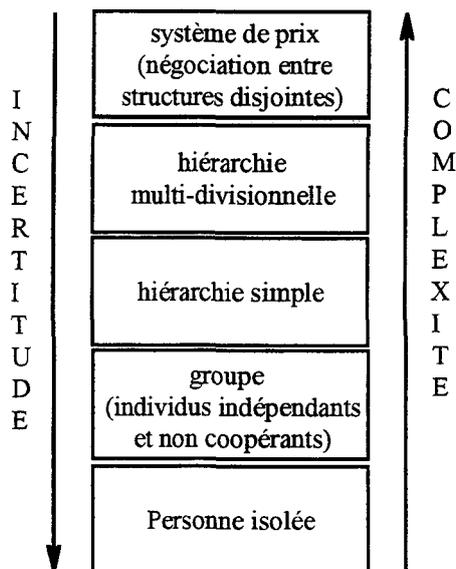


Figure II-7 : Structures d'organisations disposées selon leur degré de complexité/incertitude (Le Strugeon, 95)

Notre étude concerne deux niveaux organisationnels ou d'abstraction de la structure globale, le niveau stratégique et le niveau tactique, dont les tâches peuvent être assurées par un ou plusieurs agents (cf. figure II-8).

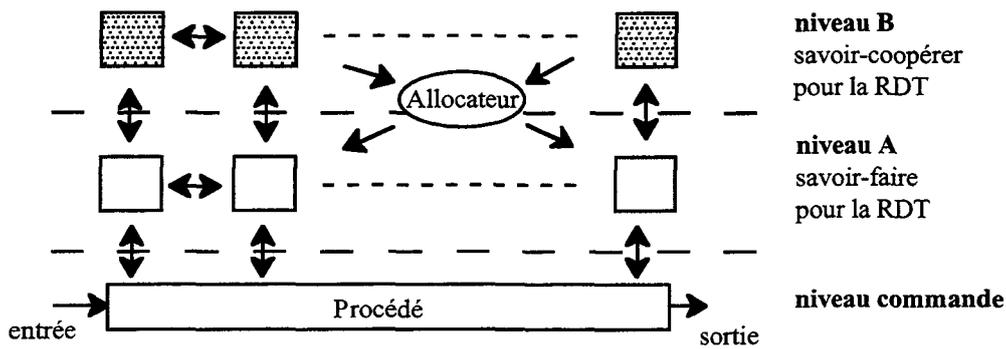


Figure II-8 : Répartition dynamique de tâches multiniveau

Cette notion de niveaux d'abstraction occupés par plusieurs agents humains ou artificiels peut s'étendre (Lemoine, 95-1). Elle permet de décomposer toute activité en plusieurs niveaux plus ou moins spécifiés, définis par les tâches qui y sont exercées. Ces tâches sont prises en charge par les agents en fonction des capacités et compétences de chacun.

La structure organisationnelle étant mise en place, la partie suivante présente les modes de répartition qu'il est possible d'adopter.

4.2. La structure et les acteurs de la répartition dynamique de tâches

Vanderhaegen (1993) distingue trois modes de répartition des tâches permettant de positionner la gestion du pilotage sur des systèmes multiniveaux. Nous les présentons en nous basant sur la structure multiniveau décrite dans le paragraphe précédent.

4.2.1. Répartition dynamique de tâches interne

La gestion de la répartition de tâches est *interne* au niveau d'abstraction concerné par ces tâches. Se sont donc les agents de ce niveau qui pilotent l'allocateur suivant (cf. figure II-9) :

- le mode implicite si le pilotage est réalisé par un agent artificiel,
- le mode explicite si le pilotage est réalisé par un agent humain.

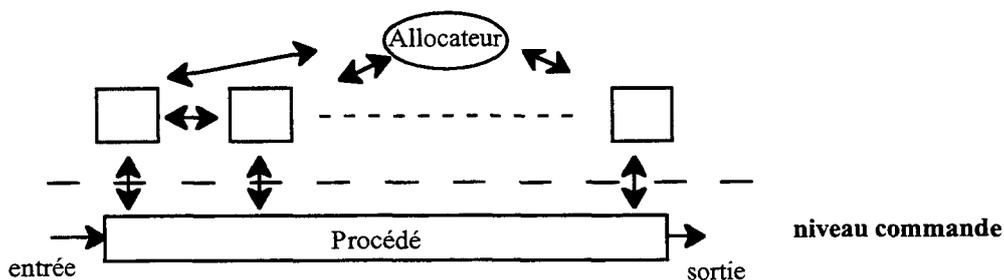


Figure II-9 : Répartition dynamique de tâches interne

L'agent chargé de piloter le répartiteur effectue une tâche différente de celle de son niveau puisqu'elle concerne le savoir-coopérer pour la répartition dynamique de tâches.

4.2.2. Répartition dynamique de tâches externe

La gestion de la répartition de tâches est *externe* au niveau concerné par ces tâches (cf. figure II-10). Se sont des agents appartenant à un autre niveau qui pilote le répartiteur. Crévits (1993) y distingue également les modes implicite et explicite. De même qu'en répartition interne, la répartition externe est :

- implicite, si la répartition des tâches réalisées à un niveau A est assurée par un agent *artificiel* d'un niveau B,
- explicite, si la répartition des tâches réalisées à un niveau A est assurée par un agent *humain* d'un niveau B.

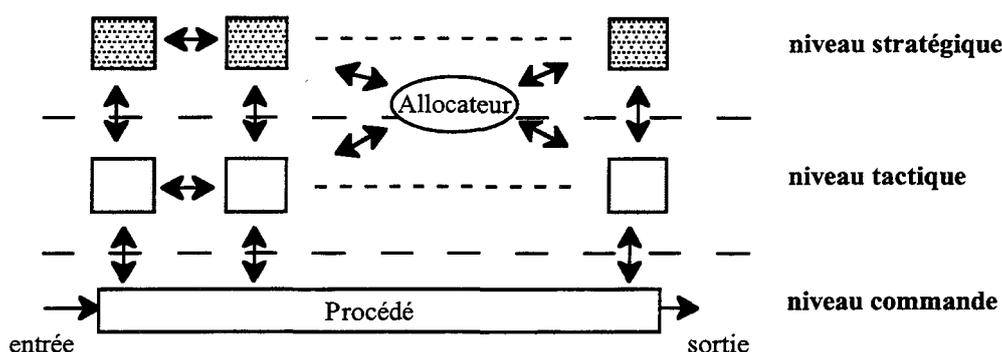


Figure II-10 : Répartition dynamique de tâches externe

Dans ce cas de figure, les agents des deux niveaux, A et B, réalisent les tâches propres à leur niveau.

4.2.3. Répartition dynamique de tâches mixte

La gestion de répartition de tâches mixte regroupe les deux types interne et externe. La répartition s'effectue suivant les principes de la répartition dynamique externe, elle est décidée par le niveau B, mais l'affectation peut être remise en cause par un agent du niveau A.

L'agent du niveau A peut :

- soit demander au décideur du niveau B de modifier l'affectation,
- soit modifier lui-même l'affectation.

La modification de la répartition peut apparaître dans le mode implicite lorsque les critères de répartition utilisés par l'agent artificiel du niveau B ne sont pas judicieux. Mais elle peut aussi apparaître en mode explicite lorsque les agents humains des deux niveaux sont en désaccord. Les types de désaccord qui peuvent se produire entre les agents sont présentés dans le chapitre suivant. Les désaccords entre agents humains serviront de référence pour comprendre ceux qui se produisent entre agents humains et artificiels, et notamment la non utilisation par les opérateurs humains de certains outils d'assistance. C'est le savoir-coopérer qui est augmenté puisqu'il y a plus d'interférences positives entre les agents des deux niveaux.

La répartition dynamique de tâches mixte semble résoudre certains des problèmes soulevés par les études antérieures qui étaient basées sur une répartition interne. La répartition dynamique mixte réalise un compromis en diminuant la charge de travail de l'opérateur (augmentée de la tâche d'affectation), et en favorisant la confiance envers les agents artificiels (surveillés par un opérateur humain). De plus, ce mode donne la possibilité à l'opérateur du niveau A de modifier

la répartition. Pour compléter ce point, la partie suivante présente les différentes formes de planification ou de modification de la répartition.

4.3. Les mécanismes de la répartition dynamique de tâches

Dans les premiers travaux de la répartition dynamique de tâches (Milot, 88), le principe d'allocation était d'une part de type uniquement réactif, c'est-à-dire sans souci de planifier la répartition. D'autre part, l'allocation s'appuyait sur une prédiction des compétences et capacités des agents supposées connues, et ne prévoyait donc pas de nécessité de remise en cause selon une évolution non prévue du contexte des tâches. Ceci s'explique par la simplicité des contextes expérimentaux choisis dans ces études de faisabilité préliminaire. Dans un second temps, la tentative d'extension du domaine réel et complexe du contrôle aérien a imposé d'affiner les principes : la notion de préemption dans l'allocation des tâches, et la nécessité de planifier la répartition.

4.3.1. Répartition dynamique de tâches préemptive

Debernard (1993) a défini la répartition dynamique de tâches *préemptive* comme la possibilité de modifier l'allocation des tâches en cours d'exécution. La répartition ne peut être préemptive que si la tâche concernée par la reprise est transférable de l'un à l'autre des agents. La transférabilité se définit en fonction des capacités et compétences des agents. Il est aisé de savoir s'il est possible d'attribuer une tâche au système d'aide puisque que ses caractéristiques sont connues. Elles le sont beaucoup moins pour l'opérateur humain.

Quatre possibilités de réallocation de tâche sont identifiables, trois sont facilement applicables, la dernière étant plus difficile (cf. figure II-11).

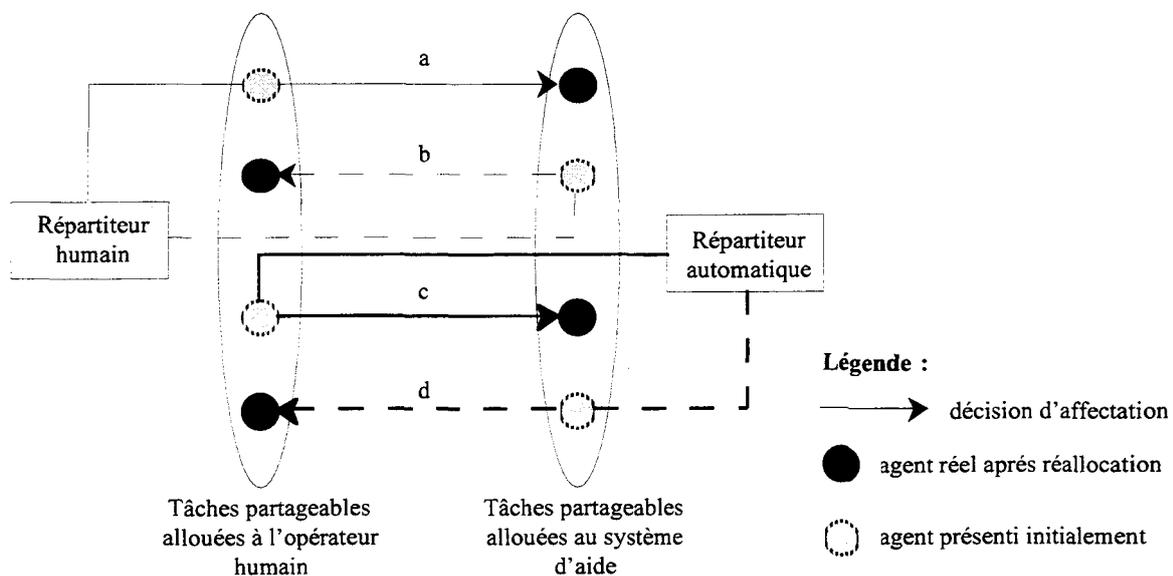


Figure II-11 : Possibilités de transfert

a. Réallocation d'une tâche partageable au système d'aide par l'opérateur humain.

La tâche était préaffectée à l'opérateur humain par ce dernier, mais il décide de changer l'allocation. Ce besoin peut apparaître lorsque l'opérateur ressent une surcharge de travail. Si la tâche était préaffectée à l'opérateur humain par le répartiteur automatique, celui-ci n'avait pas su détecter la surcharge de travail humaine.

b. Réallocation par l'opérateur humain d'une tâche partageable affectée au système d'aide.

La raison de la reprise est multiple :

- L'opérateur peut ne pas avoir une charge de travail trop élevée et à l'inverse du phénomène cité ci-dessus, il reprend une tâche. Si la préallocation était décidée par l'opérateur humain, il a alors commis une erreur d'affectation. Si la préallocation était décidée par le répartiteur automatique, alors celui-ci a surévalué la charge de travail de l'opérateur humain.
- L'opérateur humain a besoin d'intégrer cette tâche dans ses actions pour résoudre un problème plus global. L'action entreprise par le système d'aide n'aurait pas répondu à ce problème. Si la préallocation était décidée par l'opérateur humain, il a alors commis une erreur de planification. Si la préallocation était décidée par le répartiteur automatique, alors celui-ci a mal évalué l'état du procédé et des actions que pouvait mettre en œuvre l'agent humain.
- L'action calculée par le système d'aide est mauvaise ou améliorable. L'opérateur humain reprend la tâche à sa charge car :
 - il n'est pas surchargé et il peut améliorer l'action,
 - quelle que soit sa charge de travail, l'action est trop risquée.

L'opérateur humain a mal évalué l'état du procédé, ou n'a pas contrôlé l'action réalisée par le système d'aide.

c. Réallocation au système d'aide d'une tâche partageable allouée à l'opérateur humain.

Ce transfert est difficilement envisageable puisque l'opérateur humain a planifié son activité, et chaque tâche en cours d'action peut dépendre de la réalisation d'une autre tâche. Cependant, cette reprise peut apparaître dans un cas extrême de surcharge de l'opérateur, qui conduirait ce dernier à commettre des erreurs. Si l'erreur est reconnue par le répartiteur automatique, l'action mise en œuvre peut être soit bloquée, soit modifiée par le système d'aide. Ce principe est à rapprocher d'une caractéristique des outils d'assistance citée dans le premier chapitre, relative à la tolérance aux erreurs humaines. Nous ne l'avons pas mis en œuvre et évalué, pour des raisons évidentes de faisabilité technique.

d. Réallocation par le répartiteur automatique à l'opérateur humain d'une tâche partageable allouée au système d'aide.

Le répartiteur réalloue une tâche à l'opérateur humain si l'évolution du procédé est telle que les compétences et capacités du système sont dépassées. Ce cas peut notamment survenir lors d'un incident. C'est un cas particulier du cas b, mais sous le contrôle du répartiteur automatique. Cette réallocation possible constitue l'une des précautions que la répartition dynamique de tâches doit intégrer. Il ne faut pas que la charge de travail globale soit plus importante que celle admissible par l'opérateur humain, en d'autres termes il ne faut pas donner au système d'aide des tâches que l'opérateur humain ne saurait reprendre à sa charge. De plus, il est indispensable de fournir à l'opérateur humain des outils d'assistance facilitant la reprise de situations dégradées.

La possibilité de préemption apporte une souplesse supplémentaire à la gestion de la répartition de tâches, mais aussi une tâche supplémentaire à gérer. Il serait préférable d'éviter ces tâches supplémentaires de réallocation. Deux moyens peuvent modérer la remise en cause des allocations : une meilleure connaissance des interactions homme-machine, mais aussi la construction d'une meilleure prévision de l'évolution du procédé. Crévits (1995) s'appuie sur la possibilité de prédire les tâches pour définir la répartition dynamique de tâches *anticipée*. Les tâches n'étant plus traitées de façon réactives mais prédites, cela permet au répartiteur de planifier l'allocation avant que les tâches ne soient réalisées.

4.3.2. Répartition dynamique de tâches anticipée.

S'il est possible d'obtenir une prédiction fiable de l'évolution du procédé, la répartition dynamique de tâches anticipée peut permettre de mieux planifier la régulation de la charge de travail de l'opérateur humain. Une régulation planifiée peut être remaniée de façon à répondre à ce qui n'a pu être prédit, suite aux incertitudes ou aux perturbations, sans modifier les actions en cours. Ainsi, l'opérateur humain est à même de réagir en temps réel sur les événements imprévus. De plus, cette régulation, basée sur une estimation de la charge de travail sur une période de temps, détecte les surcharges et planifie l'activité afin de limiter à ce qui est nécessaire le nombre de tâches partageables allouées à l'opérateur humain. La partie suivante est consacrée au développement de ce mécanisme de la répartition dynamique, et présente les modalités de sa mise en œuvre. Nous allons nous appuyer sur l'exemple du contrôle aérien pour définir les principes.

Il s'agit d'améliorer la politique de commande de l'allocateur, en réalisant une prédiction de la charge du contrôleur afin de minimiser les problèmes cités avant. La prédiction de cette charge passe par un modèle de tâches du contrôleur et utilise une méthode issue des techniques d'ordonnancement. L'objectif n'est pas de déterminer l'ordonnancement des tâches du contrôleur car cet ordonnancement ne serait pas nécessairement respecté par le contrôleur humain, mais de vérifier si l'ordonnancement des tâches est possible. Si ce n'est pas le cas, le contrôleur va être surchargé et certaines tâches partageables doivent être affectées à SAINTEX pour rendre l'ordonnancement réalisable.

4.3.2.1. Définition et formalisation des tâches

La notion de tâches est évidemment un point central de la répartition dynamique. Au niveau de détail où ce paragraphe se situe, nous allons tenter de mieux définir la tâche.

Elle apparaît comme l'un des éléments d'une décomposition hiérarchique du travail, du projet, de la mission à réaliser (Crévits, 96). Elle se décrit à partir de la notion de but (Lee, 92). Lee définit le but comme étant l'objectif d'une tâche. Les opérations sont les moyens d'atteindre le but. La combinaison des opérations constitue le plan. De même, pour Hoc (1987), la tâche se définit par des buts et des conditions d'obtention. La précision du plan dépend de la durée qui sépare le but de son obtention; plus le but est général, plus il faudra créer de sous-buts pour parvenir à la réalisation de la tâche. Elle évolue donc entre deux états, un état initial et un état final. La tâche initiale correspond à la représentation, parfois imprécise et mal définie, que se fait l'agent de la tâche qu'il doit exécuter. La tâche finale est parfaitement connue de l'agent puisque spécifiée, voire en cours d'exécution.

La tâche admet donc un aspect temporel. Nous venons d'en constater un premier, celui séparant la tâche initiale et la tâche finale. Mais d'autres temps doivent aussi être pris en compte. Ces temps sont relatifs à son exécution. La formalisation des tâches repose alors sur la connaissance de trois paramètres (Vanderhaegen, 93) (Crévits, 96) :

- r est la date de disponibilité, avant laquelle la tâche ne peut démarrer,
- d est la date d'échéance, avant laquelle la tâche doit être terminée,
- p est le temps de traitement requis pour la tâche.

Notons que la tâche n'est réalisable que si $p < d - r$ (cf. figure II-12).

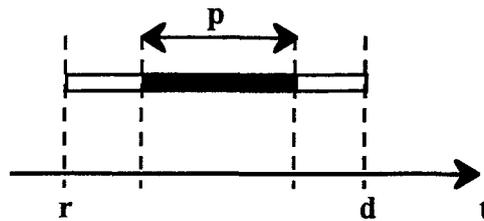


Figure II-12 : Formalisation d'une tâche.

Un quatrième paramètre indicateur de la partageabilité de la tâche est ajouté :

- s est l'indicateur binaire de partageabilité prenant la valeur vraie lorsque la tâche est partageable, et fausse sinon.

Les tâches sont identifiées au moyen de différentes méthodes présentées dans le premier chapitre. Le paragraphe suivant présente le module qui s'appuie sur ce formalisme et qui prédit les surcharges du contrôleur radar de façon à piloter l'allocateur pour les réduire.

4.3.2.2. Prédiction des surcharges de travail

Les tâches, reconnues en fonction de leurs contraintes et de leur partageabilité, sont organisées de façon à élaborer un plan. Puisque les tâches sont anticipées, leur existence ou leur définition peut être remise en question dès l'apparition de nouvelles informations sur le procédé. De ce fait, un plan sert de base à l'élaboration d'un nouveau plan (Hoc, 87).

Un plan se construit en fonction des ressources qui lui sont affectées. En répartition dynamique de tâches les ressources sont des agents réalisant les tâches et de deux types, l'homme et le système d'aide.

Le système d'aide ne peut être considéré comme ressource que si la tâche qu'il doit réaliser est partageable. Nous avons vu que, dans le contrôle aérien, les tâches partageables ne forment qu'un sous-ensemble des tâches que peut traiter l'opérateur humain puisque celui-ci est capable de traiter toutes les tâches. Cependant le système d'aide peut traiter plusieurs tâches simultanément, plus exactement en temps partagé.

Au contraire, l'opérateur humain est a priori capable de réaliser l'ensemble des tâches. Lorsque la complexité de cet ensemble augmente alors il faut chercher à réguler sa charge. L'opérateur humain étant le principal acteur, les hypothèses suivantes sont émises, ces hypothèses nous serviront de règles pour l'ordonnancement :

- à chaque instant, l'opérateur humain ne peut traiter qu'une seule tâche, si celle-ci requiert une activité attentionnelle.
- l'opérateur humain est capable de traiter n'importe quelle tâche, sous réserve de la première hypothèse,
- l'opérateur humain peut décider de débiter une tâche à tout moment,
- lorsque l'opérateur humain débute l'exécution d'une tâche, il la réalise sans interruption, sauf incident.

Cependant, Shiffrin et Schneider ((1977) dans (Hoc, 96)) notent que, dès que l'activité de l'homme atteint le niveau des habiletés (au sens de Rasmussen), un automatisme peut s'exécuter en parallèle avec une activité attentionnelle. Mais il serait difficile de l'exploiter pour construire la prédiction de tâches.

A partir de la situation courante du procédé, l'ensemble de tâches à réaliser est construit. De cet ensemble de tâches, les surcharges de travail sont recherchées. S'il existe des surcharges, elles sont levées par réallocation de tâches partageables au système d'aide. Crévits (1996) identifie trois problèmes devant être résolus (cf. figure II-13), un problème de décision sur une faisabilité de l'ensemble des tâches par un seul agent (nécessité de les partager), un problème de recherche des tâches à répartir et un problème de partitionnement (répartiteur).

a. *Le problème de décision* pose la question : "Est-il possible d'exécuter sans interruption toutes les tâches, en respectant leur date de disponibilité et leur d'échéance, sans chevauchement entre elles ? Le chevauchement signifie que les tâches seront exécutées sans interruption en respectant les contraintes de dates de disponibilité et d'échéance, mais en ne respectant pas l'hypothèse selon laquelle l'opérateur humain ne peut traiter au plus qu'une seule tâche à chaque instant. S'il y a chevauchement, alors il est nécessaire de répartir les tâches. Plus précisément, ce module qualifie les sous-ensembles de tâches, qui sont soit tolérables, soit intolérables (cf. définitions et figure II-14).

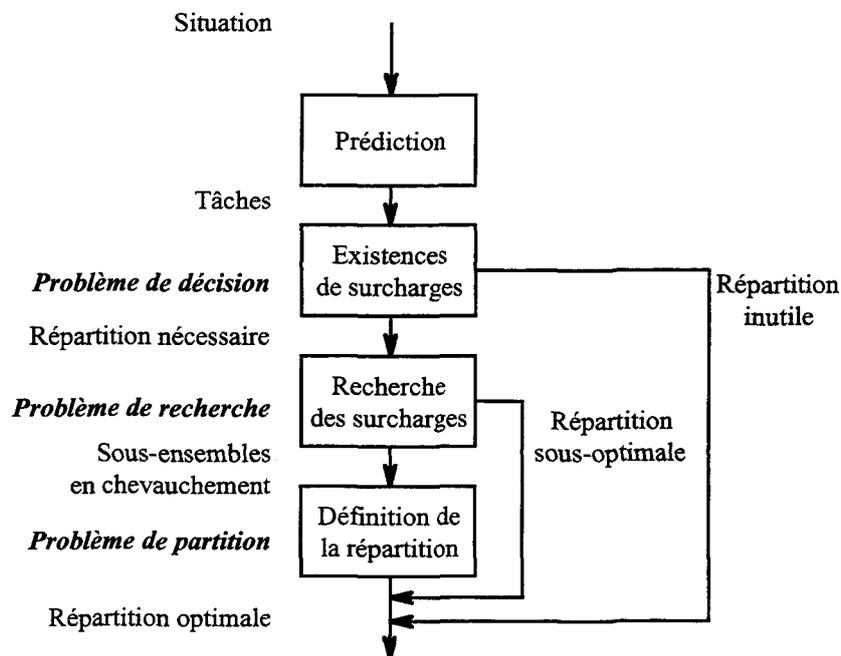


Figure II-13 : Problèmes soulevés par la répartition dynamique de tâches anticipée (Crévits, 96)

Définition d'un ensemble tolérable : soit I un ensemble de tâches. I est tolérable s'il ne contient pas deux tâches se recouvrant.

Définition du recouvrement : deux tâches se recouvrent si l'intersection de leurs périodes respectives de traitement est non vide quelle que soit l'organisation des traitements.

Illustration :



Figure II-14 : Tâches en recouvrement.

La tolérabilité et le recouvrement offrent donc une traduction du problème de décision, et donc de la nécessité ou non d'élaborer une répartition de tâches.

b. Le problème de recherche examine s'il existe des sous-ensembles de tâches exécutées en chevauchement. La notion d'ensemble présentant des chevauchements est liée à la définition des ensembles strictement intolérables (cf. définitions).

Définition d'un ensemble strictement intolérable : Soit I un ensemble de tâches. I est strictement intolérable si $N_I > D_I$.

sachant que :

- N_I est le temps requis pour traiter toutes les tâches d'un ensemble I .

$$N_I = \sum_{i \in I} p_i$$

- D_I est le temps disponible de I , c'est-à-dire le plus petit intervalle contenant toutes les tâches.

$$D_I = \max_{i,j \in I, i \neq j} (d_i - r_j)$$

La notion d'ensemble strictement intolérable localise donc les surcharges d'un ensemble de tâches et précise les solutions du problème de recherche.

La répartition ne sera optimale que s'il est possible de réguler la charge de travail de l'opérateur en n'allouant que ce qui est nécessaire au système d'aide. La répartition sera sous-optimale s'il y a simplement détection de surcharge, sans régulation de la charge de travail de l'opérateur.

c. Le problème de partition définit la répartition entre l'opérateur humain et le système d'aide, afin de parvenir à une répartition optimale, veillant à maintenir la charge de travail de l'opérateur humain en dessous du seuil de surcharge de travail. Ce problème consiste en effet à obtenir deux ensembles de tâches disjoints, l'un tolérable et affecté à l'opérateur, l'autre partageable et affecté au système d'aide (cf. définitions).

Définition d'un ensemble partitionnable : Soit I un ensemble de tâches partitionnable. I est partitionnable s'il existe un sous-ensemble I' inclus tel que I' soit tolérable et $I - I'$ soit partageable.

Définition d'un ensemble partageable : Soit I un ensemble de tâches. I est partageable si toutes les tâches qu'il contient sont partageables.

La recherche des ensembles tolérables est largement détaillée dans la thèse d'Igor Crévits (Crévits, 96). Nous ne détaillerons pas ici cet aspect. Nous nous contenterons de connaître des ensembles, partageables et tolérables, d'expérimenter leur application sur un environnement réel, de constater leur impact sur le travail des opérateurs suivant deux modes de répartition. La partie suivante présente cet environnement, le contrôle de trafic aérien, la définition des outils d'assistance fournis aux opérateurs, ainsi que les modes de répartition adoptés.

5. Application de la nouvelle approche.

Les principes de la coopération multiniveau ont été mis en place. Cette dernière partie présente les principes de la répartition dynamique de tâches multiniveau dans le contexte applicatif du contrôle de trafic aérien, sachant que les preuves de faisabilité des principes proposés ne sont évaluables qu'à partir des protocoles expérimentaux impliquant des opérateurs réels. Cette étude est appelée SPECTRA V2 (Système de Partage de tâches Expérimental pour le Contrôle de TRafic Aérien, Version 2). Le premier paragraphe montre la possibilité d'introduire ces principes au sein de l'équipe contrôleur radar - contrôleur organique. Puis les outils d'assistance sont présentés, ainsi que les modes de coopération qu'il est possible de tester.

5.1. Mise en place de la répartition dynamique de tâches.

Les études antérieures ont souligné trois principaux résultats. Il s'agit :

- de la nécessité de disposer de deux agents tactiques pour assurer la régulation du trafic en augmentation, le contrôleur radar et SAINTEX,
- de profiter des avantages d'une répartition implicite qui améliore les performances du système homme-machine,
- de profiter des avantages d'une répartition explicite, acceptée par les contrôleurs, mais qui implique une tâche supplémentaire à gérer.

L'analyse de l'activité de contrôle de trafic aérien a montré la présence de deux niveaux d'abstraction, le niveau stratégique occupé par le contrôleur organique, et le niveau tactique occupé par le contrôleur radar. Cette organisation se prête donc à l'application de la répartition dynamique externe. Le contrôleur organique détient le rôle du répartiteur. Il dispose en effet des informations sur les avions plus tôt que le contrôleur radar, notamment par communication avec les contrôleurs organiques des secteurs adjacents. Le niveau stratégique peut ainsi planifier l'activité avant l'entrée des avions dans son secteur. Les conflits partageables potentiels sont eux aussi connus dès l'entrée des vols dans le secteur. De ce fait, le contrôleur organique est à même d'allouer les tâches, disposant d'informations sur le trafic et sur le contrôleur radar avec lequel il ne cesse de communiquer.

Nous visons alors à assister le contrôleur organique en équipant le niveau stratégique d'une aide à l'évaluation de la situation et à la répartition appelée PLAF (PLanification d'AFfectation) (cf. figure II-15).

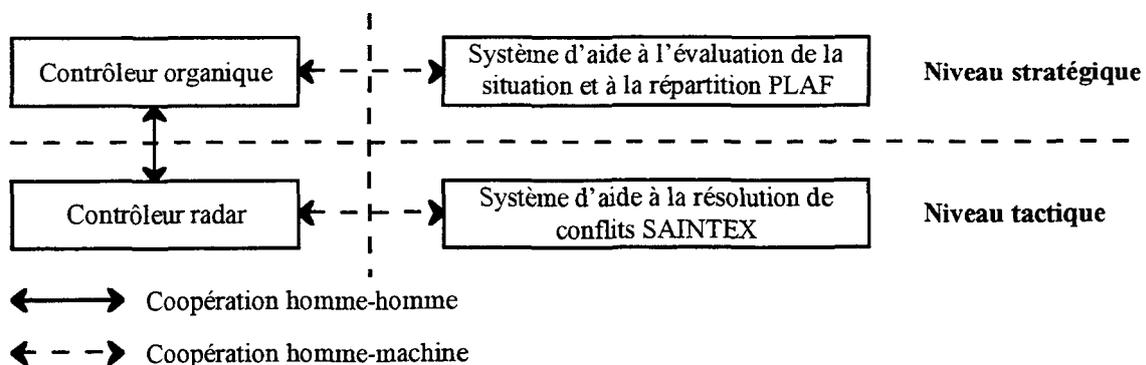


Figure II-15 : Assistance au contrôle de trafic aérien

Le contrôleur radar se trouve ainsi libéré de l'activité de répartition. Il peut cependant négocier avec le contrôleur organique ou piloter l'allocation s'il le désire. Les différents modes de négociation entre les deux contrôleurs et avec PLAF sont à la base de la définition de deux modes de répartition, dits *explicite* et *explicite assisté*.

5.2. Assistance tactique

En supplément à la première version de SAINTEX, présentée par l'étude SPECTRA V1, la version utilisée par cette nouvelle approche intègre la résolution en niveau des conflits aériens. Elle est appliquée lorsqu'un conflit se produit entre un avion stable en niveau et un avion évolutif (avion devant monter ou descendre). La résolution consiste alors à ordonner, à l'avion évolutif, le changement de niveau plus tôt.

La figure II-16 rappelle les deux types de résolution.

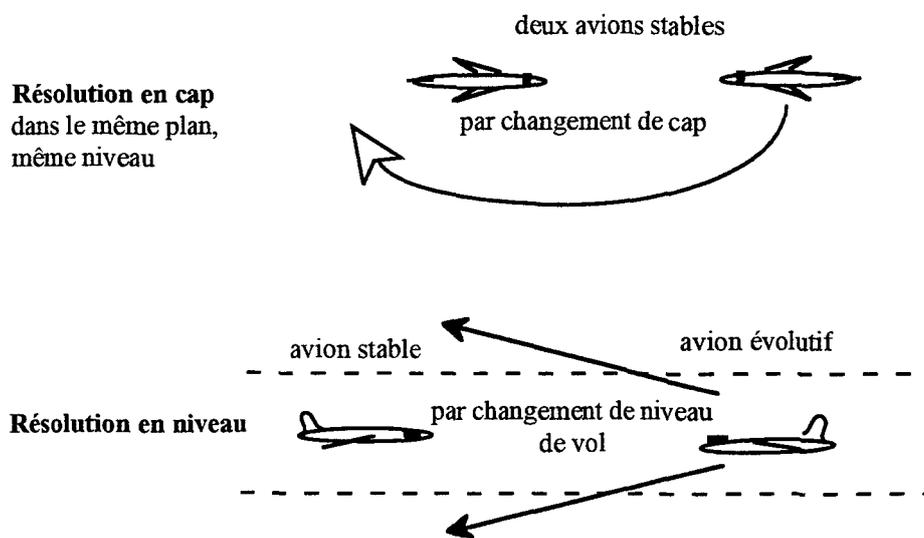


Figure II-16 : Résolution par SAINTEX

La reconnaissance des conflits partageables est réalisée dès l'entrée de l'un des avions dans le secteur. La partageabilité n'est pas remise en cause, sauf incident ou modification de trajectoire d'un contrôleur sur l'un des deux avions. De cette façon, le contrôleur organique peut prendre connaissance de la possibilité de partager les tâches entre SAINTEX et le contrôleur radar. Le paragraphe ci-après présente l'aide à la répartition des tâches du niveau tactique qui est maintenant une tâche supplémentaire pour le contrôleur organique.

5.3. Assistance stratégique

L'outil d'assistance stratégique PLAF fournit une aide à la prédiction du trafic, à son évaluation en terme de conflits et de surcharge du contrôleur radar afin de définir la répartition des conflits entre ce dernier et SAINTEX.

Suivant le mode de répartition choisi, PLAF peut intervenir de deux façons. La première consiste à proposer une évaluation de la situation aux contrôleurs. La seconde modalité est le pilotage du répartiteur, réalisé à partir de cette évaluation. Nous détaillerons ultérieurement les modes de répartition en fonction de l'intégration de PLAF. Le principe de fonctionnement de PLAF est maintenant précisé.

Base de la répartition dynamique anticipée de tâches, PLAF construit une prédiction de la situation à venir. L'outil s'appuie sur les événements de contrôle dont l'apparition est certaine. Il anticipe ainsi les tâches de contrôle que les opérateurs doivent réaliser.

Les événements de contrôle prédictibles sont liés à la connaissance des trajectoires des avions en termes géographiques et temporels. Nous avons remarqué dans la présentation de l'organisation du contrôle de trafic aérien, que le contrôleur peut disposer d'informations sur les avions devant entrer dans son secteur dès la préparation de leur sortie du secteur précédent. Nous procédons alors de manière similaire. Nous disposons en effet des travers balises, données indiquant l'heure estimée à laquelle un avion survole une balise. De même, toutes les balises composant la route de l'avion sont connues. La simplification imposée par le trafic de nuit nous permet de ne considérer que quatre balises dont deux à l'intérieur du secteur contrôlé. Les deux autres balises sont la balise de sortie du secteur précédent, et la balise d'entrée du secteur suivant. La traversée du secteur n'est donc qu'une droite. Il est alors aisé d'extrapoler les trajectoires des avions afin de construire une représentation du trafic sur une période de prédiction, et de détecter notamment les conflits.

Les prédictions de conflits sont réalisées niveaux par niveaux pour les avions évolutifs, c'est-à-dire aux avions dont le niveau, conformément au plan de vol, doit changer dans le secteur.

A partir des plans de vol et des conflits entre avions, il est alors possible de déduire les tâches que le contrôleur radar doit réaliser pour assurer la sécurité et la gestion correcte des avions.

Le modèle intégré dans PLAF est basé sur l'utilisation de six tâches génériques (Crévits, 96) :

- la tâche "assume" d'un avion en entrée de secteur, c'est-à-dire la prise de contact entre le pilote et le contrôleur,
- la tâche de détournement d'un avion, c'est-à-dire une modification de cap en conservant l'avion au même niveau, en vue de résoudre un conflit,
- la tâche de remise sur route d'un avion détourné en cap à la fin du conflit,
- la tâche de mise à niveau, c'est-à-dire le changement de niveau par le contrôleur, conformément au plan de vol,
- la tâche de transfert d'un avion au secteur suivant,
- la tâche de surveillance d'un avion ou d'un conflit.

Ces tâches sont caractérisées par les paramètres définis avant, c'est-à-dire les paramètres temporels r , d et p , et l'indicateur de partageabilité s .

Les tâches d'assume et de transfert sont liées aux événements de travers et consistent respectivement à intégrer l'avion dans le trafic du secteur contrôlé et à effectuer le transfert en fréquence des avions en sortie du secteur. Ces tâches sont supposées non partageables car elles permettent aux contrôleurs de connaître l'ensemble des avions sous leur contrôle, ainsi que leur trajectoire.

La surveillance d'un avion non conflictuel constitue la tâche minimale associée à chaque avion, soit pour s'assurer qu'il n'est pas en conflit, soit pour vérifier si sa route est respectée. Elle est bornée par les tâches d'assume et de transfert.

Les tâches de gestion de conflit entre deux avions stables bornées par les tâches d'assume et de transfert de chaque avion, intègrent :

- une tâche de résolution de conflit qui consiste en une déviation de l'un des avions,
- une tâche de remise en directe qui replace l'avion déviée sur sa route initiale,
- des tâches de surveillance, de l'évolution conforme à l'ordre transmis au pilote et de retour à la route initiale après le conflit.

Les tâches de gestion de conflit entre plusieurs avions stables ou évolutifs sont de même nature que précédemment, mais leur nombre et leur complexité sont liés aux nombres et aux types de conflits.

Les valeurs des paramètres temporels, r (date de début) et d (date de fin) sont déterminées à partir des contraintes temporelles du trafic. Par contre, p (durée d'exécution) est assignée empiriquement à partir d'essais réalisés avec des contrôleurs professionnels.

A partir de la prédiction construite sur ce modèle de tâches, un module informatique détecte les surcharges de travail. Une surcharge est localisée par la détection d'un ensemble de tâches strictement intolérable (cf. Chapitre II § 4.3.2.2). La levée de l'intolérabilité implique l'obtention d'un ensemble de tâches tolérable et d'un ensemble de tâches partageable. La régulation de la charge de travail consiste alors à allouer l'ensemble tolérable à l'opérateur humain, et l'ensemble partageable au système d'aide SAINTEX.

5.4. Modes explicite et explicite assisté

Les modes de répartition *explicite* et *explicite assisté* définissent deux modes de négociation possibles entre les contrôleurs et l'assistance à la répartition. Ces modes doivent nous permettre d'évaluer les hypothèses suivantes :

- l'introduction de l'anticipation dans la définition de la répartition,
- l'intégration d'une répartition dynamique de tâches externe s'appuyant sur le contrôleur organique,
- l'introduction d'un outil d'assistance à la définition de la répartition par le contrôleur organique.

Ces modes de répartition ont en effet les caractéristiques suivantes :

- Le mode explicite autorise les deux contrôleurs radar et organique à piloter l'allocateur de tâches. Aucune aide à la répartition n'est proposée, seuls les conflits partageables sont indiqués.
- Le mode explicite assisté n'autorise que le contrôleur du niveau stratégique à piloter l'allocateur de tâches. Une préallocation des conflits est effectuée par l'assistance stratégique. Le contrôleur organique peut changer l'allocation.

L'application des modes *explicite* et *explicite assisté* devrait démontrer l'intérêt pour le contrôleur radar, et la possibilité pour le contrôleur organique, de porter le pilotage du répartiteur sur le niveau stratégique. Elle devrait aussi définir l'apport de l'assistance stratégique, c'est-à-dire l'intérêt d'un pilotage automatique du répartiteur de tâches, et de la prédiction présentée sur son interface.

6. Conclusion

L'intérêt de ce deuxième chapitre consistait à détailler les fonctions de la répartition dynamique de tâches dans le cadre applicatif du contrôle de trafic aérien.

La première partie a décrit le domaine d'application. La deuxième partie a présenté une étude expérimentale de répartition dynamique menée dans le contrôle de trafic aérien avec SPECTRA VI et a mis en évidence les problèmes rencontrés. Ils concernent surtout la mise en place et le pilotage de l'allocateur de tâches, et la confiance que portent les contrôleurs à l'assistance tactique. Des réponses à ces problèmes sont apportées et concernent le positionnement de l'allocateur vers un niveau d'abstraction supérieur ainsi que l'aide à la planification du partage de tâches. Ainsi, l'allocation n'est plus effectuée en temps réel mais anticipée. L'organisation proposée s'inscrit dans une structure multiniveau. La dernière partie a proposé d'appliquer ces principes au contrôle de trafic aérien. Ainsi, après une description détaillée du domaine, les outils d'assistance introduits à chaque niveau ont été proposés et spécifiés, ainsi que deux modes de répartition.

La structure multiniveau étant définie, le chapitre suivant présente l'expérimentation menée avec des contrôleurs professionnels, le protocole expérimental, et les résultats issus des méthodes d'analyse traditionnelles.

Chapitre III

Protocoles expérimentaux et premières analyses

1. Introduction

Alors que les deux premiers chapitres présentent les modèles et mécanismes de la répartition dynamique de tâches et leurs applications au Contrôle de Trafic Aérien, ce troisième chapitre évalue ces modèles au travers d'une expérimentation menée au Centre de Contrôle en Route de Reims (Lemoine, 96). Ce chapitre se décompose en trois parties.

La première partie donne une description de la plate-forme expérimentale. Elle comporte notamment une justification des interfaces développées, fonctions des outils d'assistance fournis et supports de la communication homme-homme et homme-machine.

La deuxième partie de ce chapitre présente les protocoles expérimentaux. Ils définissent les situations expérimentales et le plan d'expérience permettant d'évaluer les hypothèses émises lors du deuxième chapitre.

La troisième partie consiste en l'analyse des résultats objectifs, notamment les mesures de performance, mais aussi des évaluations subjectives issues des questionnaires.

2. Plate-forme expérimentale

2.1. Position de contrôle

2.1.1. Introduction

Les interfaces homme-machine visent à reproduire une position de contrôle proche de la réalité pour fournir aux contrôleurs les moyens de base leur permettant d'appliquer les modes opératoires habituels. Elles sont donc composées d'une vue radar et d'une vue strip présentant un certain nombre d'informations sur le trafic et permettant d'agir sur les vols (cf. figure III-1). Chaque contrôleur dispose d'un poste de contrôle adapté à son activité.

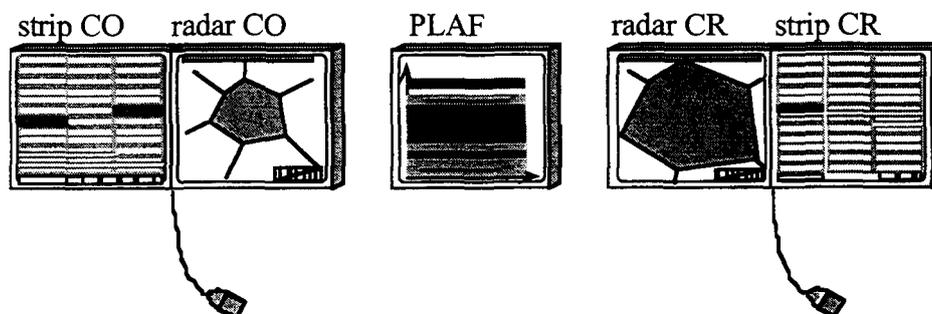


Figure III-1 : Interfaces expérimentales.

Les deux postes de contrôle présentent les mêmes informations radar, mais les commandes d'envoi d'ordres aux pilotes, et de suivi des vols sont différentes.

2.1.2. Vue radar

La vue radar est une représentation de la carte du secteur à contrôler, défini par ses limites et les routes aériennes tracées suivant les balises. Elle présente en temps réel des informations sur les vols, ainsi que les cinq positions antérieures des avions (cf. figure III-2). La position courante de l'avion est représentée par un plot carré. Sa couleur évolue en fonction de l'évolution de l'avion dans le secteur (intégration du vol par le contrôleur organique, réponse du contrôleur radar à l'appel pilote, transfert au secteur suivant). Mais la couleur du plot peut aussi signaler quatre types d'alarmes : le filet de sauvegarde (séparation entre deux avions inférieure à huit miles nautiques dans les trois minutes qui arrivent, le plot de l'avion est alors rouge), un niveau de transfert en sortie non respecté, l'appel pilote quand l'avion entre dans le secteur et l'indication que le vol est à transférer au secteur suivant, dans ces deux cas le plot de l'avion est violet. Ce type d'affichage est une aide à la surveillance du trafic, sous forme d'alarme, pour les contrôleurs. En effet, quatre points généraux de gestion de trafic font l'objet de rappels audio et visuel lorsque le contrôleur n'a engagé aucune commande pour satisfaire le plan de vol en terme de sécurité, de performance et de respect des protocoles envers les autres secteurs. Les réactions des contrôleurs vis-à-vis de ces alarmes apporteront, en plus de leur intérêt, des indications sur le modèle d'activité des contrôleurs alors supposé.

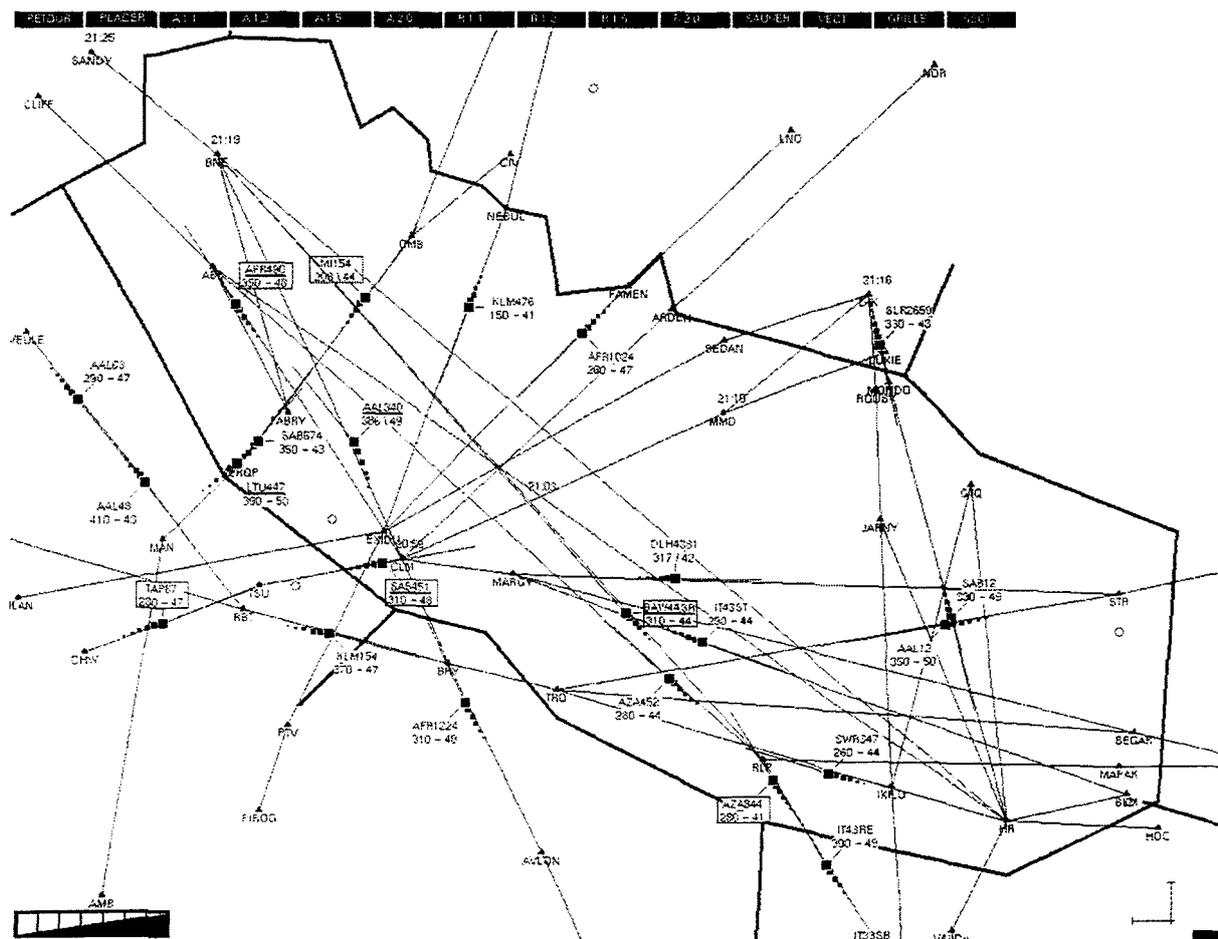


Figure III-2 : Vue radar

Les informations relatives aux plans de vol sont accessibles à partir de la vue radar. Ainsi, la route des avions peut être affichée, avec les heures estimées de passage sur chaque balise restant à atteindre, par une simple action avec la souris sur le plot de l'avion concerné.

La vue peut être configurée de manière à faire apparaître ou disparaître les balises, leur nom, les limites et les routes du secteur. Il est possible au moyen de la souris de se déplacer sur la vue radar et d'agrandir certaines parties. Le contrôleur dispose également de la possibilité de visualiser la position anticipée des vols à trois, six ou neuf minutes, par l'intermédiaire du vecteur vitesse. Pour aider le contrôleur dans l'évaluation des distances entre les objets, un outil appelé "alidad" permet de réaliser ces mesures sur la vue radar. Une grille dont le pas est de dix milles nautiques est également affichable pour faciliter la localisation précise des avions.

La vue radar permet d'envoyer des ordres aux avions, en cap ou en niveau. En revanche, il n'est pas possible de modifier le taux d'évolution des avions, ni leur vitesse, à cause de limitations dues au simulateur.

Chaque plot d'avion est suivi d'une étiquette (cf. figure III-3). Elle contient l'indicatif du vol, le niveau de vol actuel de l'avion, sa vitesse et la tendance d'évolution en altitude de l'avion. La sélection du niveau de vol sur l'étiquette, avec le pointeur de la souris, entraîne l'ouverture d'un menu permettant la modification de niveaux de vol :

- le niveau de vol courant, pour le contrôleur radar,
- les niveaux d'entrée/sortie du secteur, pour le contrôleur organique.

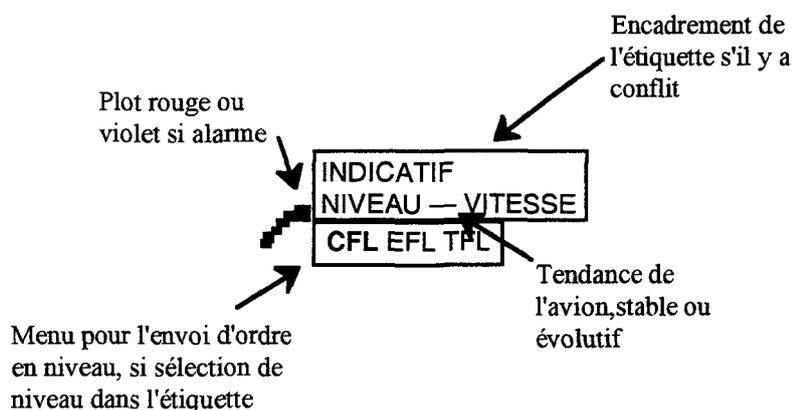


Figure III-3 : Étiquette et plot représentatifs de l'avion

Les ordres en cap peuvent être absolus ou relatifs et ne peuvent être donnés que par le contrôleur radar. Par le même moyen, il est également possible au contrôleur de consulter le cap actuel de l'avion (cf. figure III-4).

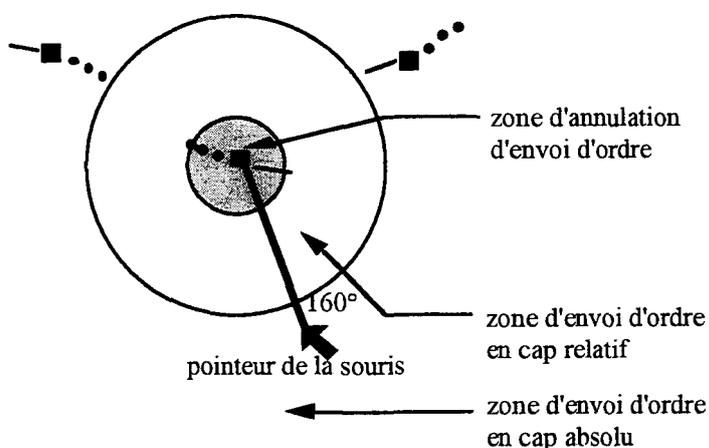


Figure III-4 : Ordres en cap

Une autre possibilité de modification de cap des avions est l'envoi d'ordre en direct. Il consiste à indiquer au pilote la balise sur laquelle il doit se diriger. Sur la vue radar, cet envoi d'ordre est possible par affichage de la route graphique (cf. figure III-5). Une fois affichée, elle permet au contrôleur radar d'envoyer des "directes" sur toutes les balises postérieures à la position courante du vol, par relâchement du pointeur de la souris sur la balise concernée.

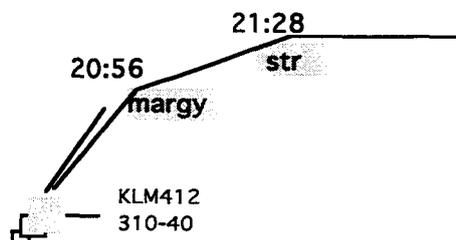


Figure III-5: Utilisation des routes graphiques

Dans les situations où les contrôleurs sont assistés par un outil d'aide, il a été nécessaire de développer des moyens de communication entre les contrôleurs et ces outils, pour éviter des conflits de coordination ou décisionnels. Sur la vue radar, la communication se réalise au moyen de l'encadrement des étiquettes des avions (cf. figure III-3). SAINTEX indique la partageabilité des conflits et leur allocation par la couleur de ces encadrements (conflit non partageable, rouge, conflit partageable alloué au contrôleur, vert, conflit partageable alloué à SAINTEX, violet, conflit potentiel, saumon).

Par ailleurs, si l'avion désigné fait partie d'un conflit, les routes des avions interférants sont également dessinées. La date d'entrée prévue sous la distance de séparation est alors affichée au point de croisement des routes.

2.1.3. Vue strip

La vue strip (cf. figure III-6) est la reproduction sur écran graphique du tableau de strips papiers habituellement manipulé par les contrôleurs. La forme graphique est appelée "strip électronique" par les contrôleurs. Le passage du strip papier au strip électronique permet d'une part d'enregistrer informatiquement les manipulations des strips pour des analyses ultérieures, et d'autre part de mettre à jour en temps réel certaines informations comme le niveau de vol ou le cap.

Chaque contrôleur dispose d'un tableau de strips qu'il organise selon ses besoins. La circulation des strips du contrôleur organique vers le contrôleur radar est respectée. Le contrôleur organique reçoit le strip d'un avion quelques minutes avant son entrée dans le secteur, l'annote, puis le transmet au moment opportun au contrôleur radar. Ce dernier, après la traversée du secteur, transfère le vol, donc le strip correspondant, au contrôleur radar du secteur suivant.

Le strip présente deux types d'informations. Le premier concerne les informations inscrites dans le plan de vol :

- l'indicatif du vol,
- le type d'aéronef,
- les aéroports de départ et d'arrivée,
- le secteur précédent,
- la route composée de quatre balises et des heures estimées de passage,
- les niveaux d'entrée (EFL), de transfert (TFL) et requis par le pilote (RFL).

Le second type d'informations est affiché en temps réel et relatif au niveau courant du vol, son cap, son taux d'évolution, sa tendance d'évolution, sa vitesse en nœud et en Mach (cf. figure III-7).

Figure III-6 : Vue strip

<table border="1"> <tr><td>AFR490</td><td>CE</td><td>E 350 ▲</td><td>BRY</td><td>CLM</td><td>ABB</td><td>CLIFF</td><td>327</td><td>0</td><td></td></tr> <tr><td>DCB</td><td>EGLL</td><td>C 350</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>FAJS</td><td>350</td><td>R 350</td><td>20.45</td><td>20.49</td><td>21.00</td><td>21.07</td><td>83</td><td></td><td></td></tr> <tr><td></td><td></td><td>T 350</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td>483</td><td></td><td></td></tr> </table>										AFR490	CE	E 350 ▲	BRY	CLM	ABB	CLIFF	327	0		DCB	EGLL	C 350								FAJS	350	R 350	20.45	20.49	21.00	21.07	83					T 350					483			<table border="1"> <tr><td>SAB674</td><td>NO</td><td>E 350 ▲</td><td>MAN</td><td>KEROP</td><td>CMB</td><td>CIV</td><td>36</td><td>0</td><td></td></tr> <tr><td>LF55</td><td>EBBR</td><td>C 350</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>LFBD</td><td>350</td><td>R 350</td><td>20.54</td><td>20.57</td><td>21.07</td><td>21.12</td><td>75</td><td></td><td></td></tr> <tr><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td>435</td><td></td><td></td></tr> </table>										SAB674	NO	E 350 ▲	MAN	KEROP	CMB	CIV	36	0		LF55	EBBR	C 350								LFBD	350	R 350	20.54	20.57	21.07	21.12	75										435			<table border="1"> <tr><td>LTU447</td><td>NO</td><td>E 390 ▲</td><td>MAN</td><td>KEROP</td><td>CMB</td><td>SPV</td><td>40</td><td>0</td><td></td></tr> <tr><td>B747</td><td>EFHF</td><td>C 390</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>LFBD</td><td>390</td><td>R 390</td><td>20.55</td><td>20.58</td><td>21.07</td><td>21.25</td><td>85</td><td></td><td></td></tr> <tr><td>VALDE</td><td></td><td>T 390</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td>500</td><td></td><td></td></tr> </table>										LTU447	NO	E 390 ▲	MAN	KEROP	CMB	SPV	40	0		B747	EFHF	C 390								LFBD	390	R 390	20.55	20.58	21.07	21.25	85			VALDE		T 390					500			<table border="1"> <tr><td>AAL340</td><td>CE</td><td>E 390 ▲</td><td>BRY</td><td>CLM</td><td>ABB</td><td>CLIFF</td><td>322</td><td>-1</td><td></td></tr> <tr><td>B747</td><td>EGLL</td><td>C 370</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>LFMN</td><td>366</td><td>R 390</td><td>20.51</td><td>20.55</td><td>21.05</td><td>21.13</td><td>87</td><td></td><td></td></tr> <tr><td></td><td></td><td>T 370</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td>497</td><td></td><td></td></tr> </table>										AAL340	CE	E 390 ▲	BRY	CLM	ABB	CLIFF	322	-1		B747	EGLL	C 370								LFMN	366	R 390	20.51	20.55	21.05	21.13	87					T 370					497			<table border="1"> <tr><td>AZA452</td><td>SU</td><td>E 280 ▲</td><td>FRANE</td><td>RLP</td><td>ABB</td><td>CLIFF</td><td>312</td><td>0</td><td></td></tr> <tr><td>EA30</td><td>EGLC</td><td>C 280</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>LIVT</td><td>280</td><td>R 280</td><td>20.45</td><td>20.54</td><td>21.19</td><td>21.27</td><td>74</td><td></td><td></td></tr> <tr><td></td><td></td><td>T 280</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td>446</td><td></td><td></td></tr> </table>										AZA452	SU	E 280 ▲	FRANE	RLP	ABB	CLIFF	312	0		EA30	EGLC	C 280								LIVT	280	R 280	20.45	20.54	21.19	21.27	74					T 280					446			<table border="1"> <tr><td>SLR2659</td><td>BE</td><td>E 330 ▼</td><td>DIK</td><td>MONDO</td><td>HR</td><td>VALDA</td><td>167</td><td>0</td><td></td></tr> <tr><td>B737</td><td>DTMB</td><td>C 330</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>EBBR</td><td>330</td><td>R 330</td><td>20.57</td><td>21.00</td><td>21.16</td><td>21.20</td><td>73</td><td></td><td></td></tr> <tr><td></td><td></td><td>T 330</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td>430</td><td></td><td></td></tr> </table>										SLR2659	BE	E 330 ▼	DIK	MONDO	HR	VALDA	167	0		B737	DTMB	C 330								EBBR	330	R 330	20.57	21.00	21.16	21.20	73					T 330					430			<table border="1"> <tr><td>DLH4381</td><td>BE</td><td>E 240 ▶</td><td>MARGV</td><td>STR</td><td>TGO</td><td>91</td><td>15</td><td>72</td><td></td></tr> <tr><td>B737</td><td>EDDS</td><td>C 330</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>LFPG</td><td>317</td><td>R 330</td><td>20.55</td><td>21.14</td><td>21.24</td><td>428</td><td></td><td></td><td></td></tr> </table>										DLH4381	BE	E 240 ▶	MARGV	STR	TGO	91	15	72		B737	EDDS	C 330								LFPG	317	R 330	20.55	21.14	21.24	428				<table border="1"> <tr><td>KLM475</td><td>BE</td><td>E 150 ▼</td><td>SPV</td><td>NEBUL</td><td>EXIDU</td><td>200</td><td>0</td><td>66</td><td></td></tr> <tr><td>B747</td><td>LFPG</td><td>C 150</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>EHAM</td><td>150</td><td>R 260</td><td>20.37</td><td>20.54</td><td>21.06</td><td>415</td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td></td><td></td><td>T 150</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> </table>										KLM475	BE	E 150 ▼	SPV	NEBUL	EXIDU	200	0	66		B747	LFPG	C 150								EHAM	150	R 260	20.37	20.54	21.06	415						T 150								<table border="1"> <tr><td>AZA844</td><td>SU</td><td>E 280 ▲</td><td>FRANE</td><td>RLP</td><td>BNE</td><td>SANDY</td><td>328</td><td>0</td><td></td></tr> <tr><td>FK28</td><td>EGCC</td><td>C 280</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>LIML</td><td>280</td><td>R 280</td><td>20.49</td><td>20.59</td><td>21.29</td><td>21.35</td><td>69</td><td></td><td></td></tr> <tr><td>VROR</td><td></td><td>T 280</td><td>21.06.50</td><td>30 gauche</td><td>5 RM</td><td>414</td><td></td><td></td><td></td></tr> </table>										AZA844	SU	E 280 ▲	FRANE	RLP	BNE	SANDY	328	0		FK28	EGCC	C 280								LIML	280	R 280	20.49	20.59	21.29	21.35	69			VROR		T 280	21.06.50	30 gauche	5 RM	414				<table border="1"> <tr><td>IT435T</td><td>BE</td><td>E 240 ▶</td><td>MARGV</td><td>BLM</td><td>LFSB</td><td>110</td><td>0</td><td>75</td><td></td></tr> <tr><td>EA30</td><td>LFSD</td><td>C 290</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>LFPO</td><td>290</td><td>R 290</td><td>20.53</td><td>21.14</td><td>21.14</td><td>446</td><td></td><td></td><td></td></tr> </table>										IT435T	BE	E 240 ▶	MARGV	BLM	LFSB	110	0	75		EA30	LFSD	C 290								LFPO	290	R 290	20.53	21.14	21.14	446				<table border="1"> <tr><td>AFR1024</td><td>BE</td><td>E 260 ▼</td><td>LND</td><td>FAMEN</td><td>EXIDU</td><td>LILAN</td><td>224</td><td>0</td><td></td></tr> <tr><td>B757</td><td>LF55</td><td>C 260</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>EHAM</td><td>260</td><td>R 260</td><td>20.49</td><td>20.56</td><td>21.07</td><td>21.19</td><td>78</td><td></td><td></td></tr> <tr><td></td><td></td><td>T 260</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td>472</td><td></td><td></td></tr> </table>										AFR1024	BE	E 260 ▼	LND	FAMEN	EXIDU	LILAN	224	0		B757	LF55	C 260								EHAM	260	R 260	20.49	20.56	21.07	21.19	78					T 260					472			<table border="1"> <tr><td>SWR347</td><td>SU</td><td>E 220 ◀</td><td>HOC</td><td>HR</td><td>TRD</td><td>BRY</td><td>285</td><td>0</td><td></td></tr> <tr><td>DC9</td><td>LFPG</td><td>C 260</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>LSZH</td><td>260</td><td>R 260</td><td>20.47</td><td>20.52</td><td>21.09</td><td>21.13</td><td>74</td><td></td><td></td></tr> <tr><td></td><td></td><td>T 260</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td>446</td><td></td><td></td></tr> </table>										SWR347	SU	E 220 ◀	HOC	HR	TRD	BRY	285	0		DC9	LFPG	C 260								LSZH	260	R 260	20.47	20.52	21.09	21.13	74					T 260					446			<table border="1"> <tr><td>SAB12</td><td>BE</td><td>E 330 ▼</td><td>DIK</td><td>MONDO</td><td>HR</td><td>VALDA</td><td>165</td><td>0</td><td></td></tr> <tr><td>B747</td><td>LIML</td><td>C 330</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>EBBR</td><td>330</td><td>R 330</td><td>20.48</td><td>20.51</td><td>21.05</td><td>21.08</td><td>85</td><td></td><td></td></tr> <tr><td></td><td></td><td>T 330</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td>497</td><td></td><td></td></tr> </table>										SAB12	BE	E 330 ▼	DIK	MONDO	HR	VALDA	165	0		B747	LIML	C 330								EBBR	330	R 330	20.48	20.51	21.05	21.08	85					T 330					497			<table border="1"> <tr><td>SAR451</td><td>NO</td><td>E 310 ▶</td><td>TSU</td><td>CLM</td><td>MMD</td><td>DIK</td><td>78</td><td>0</td><td></td></tr> <tr><td>B745</td><td>EHAM</td><td>C 310</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>LFPR</td><td>310</td><td>R 310</td><td>20.54</td><td>20.59</td><td>21.10</td><td>21.16</td><td>81</td><td></td><td></td></tr> <tr><td>VALDE</td><td></td><td>T 310</td><td>21.00.36</td><td>CFL 330</td><td>0 NM</td><td>481</td><td></td><td></td><td></td></tr> </table>										SAR451	NO	E 310 ▶	TSU	CLM	MMD	DIK	78	0		B745	EHAM	C 310								LFPR	310	R 310	20.54	20.59	21.10	21.16	81			VALDE		T 310	21.00.36	CFL 330	0 NM	481				<table border="1"> <tr><td>AAL12</td><td>AL</td><td>E 330 ◀</td><td>TGO</td><td>STR</td><td>TRO</td><td>BRY</td><td>260</td><td>0</td><td></td></tr> <tr><td>B767</td><td>KJFK</td><td>C 350</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>LOW</td><td>350</td><td>R 330</td><td>20.45</td><td>20.53</td><td>21.12</td><td>21.16</td><td>86</td><td></td><td></td></tr> <tr><td></td><td></td><td>T 350</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td>502</td><td></td><td></td></tr> </table>										AAL12	AL	E 330 ◀	TGO	STR	TRO	BRY	260	0		B767	KJFK	C 350								LOW	350	R 330	20.45	20.53	21.12	21.16	86					T 350					502			<table border="1"> <tr><td>IT43RE</td><td>SU</td><td>E 390 ▲</td><td>FRANE</td><td>RLP</td><td>BNE</td><td>SANDY</td><td>328</td><td>0</td><td></td></tr> <tr><td>B747</td><td>EGKK</td><td>C 390</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>LIRR</td><td>390</td><td>R 390</td><td>20.54</td><td>21.02</td><td>21.27</td><td>21.32</td><td>87</td><td></td><td></td></tr> <tr><td></td><td></td><td>T 390</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td>495</td><td></td><td></td></tr> </table>										IT43RE	SU	E 390 ▲	FRANE	RLP	BNE	SANDY	328	0		B747	EGKK	C 390								LIRR	390	R 390	20.54	21.02	21.27	21.32	87					T 390					495			<table border="1"> <tr><td>BAW445R</td><td>SU</td><td>E 310 ▲</td><td>FRANE</td><td>RLP</td><td>BNE</td><td>SANDY</td><td>318</td><td>0</td><td></td></tr> <tr><td>DC9</td><td>EGKK</td><td>C 310</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>LIPU</td><td>310</td><td>R 310</td><td>20.42</td><td>20.51</td><td>21.19</td><td>21.25</td><td>74</td><td></td><td></td></tr> <tr><td></td><td></td><td>T 310</td><td>21.00.36</td><td>0 NM</td><td></td><td>441</td><td></td><td></td><td></td></tr> </table>										BAW445R	SU	E 310 ▲	FRANE	RLP	BNE	SANDY	318	0		DC9	EGKK	C 310								LIPU	310	R 310	20.42	20.51	21.19	21.25	74					T 310	21.00.36	0 NM		441				<table border="1"> <tr><td>AFR1224</td><td>CE</td><td>E 310 ▲</td><td>BRY</td><td>CLM</td><td>BNE</td><td>SANDY</td><td>334</td><td>0</td><td></td></tr> <tr><td>B747</td><td>EGGR</td><td>C 310</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>LFMN</td><td>310</td><td>R 310</td><td>21.00</td><td>21.03</td><td>21.17</td><td>21.22</td><td>81</td><td></td><td></td></tr> <tr><td></td><td></td><td>T 310</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td>480</td><td></td><td></td></tr> </table>										AFR1224	CE	E 310 ▲	BRY	CLM	BNE	SANDY	334	0		B747	EGGR	C 310								LFMN	310	R 310	21.00	21.03	21.17	21.22	81					T 310					480			<table border="1"> <tr><td colspan="10">JETER</td></tr> <tr><td colspan="10">REPRENDRE</td></tr> <tr><td colspan="10">20:59.00</td></tr> </table>										JETER										REPRENDRE										20:59.00									
AFR490	CE	E 350 ▲	BRY	CLM	ABB	CLIFF	327	0																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																															
DCB	EGLL	C 350																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
FAJS	350	R 350	20.45	20.49	21.00	21.07	83																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																
		T 350					483																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																
SAB674	NO	E 350 ▲	MAN	KEROP	CMB	CIV	36	0																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																															
LF55	EBBR	C 350																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
LFBD	350	R 350	20.54	20.57	21.07	21.12	75																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																
							435																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																
LTU447	NO	E 390 ▲	MAN	KEROP	CMB	SPV	40	0																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																															
B747	EFHF	C 390																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
LFBD	390	R 390	20.55	20.58	21.07	21.25	85																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																
VALDE		T 390					500																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																
AAL340	CE	E 390 ▲	BRY	CLM	ABB	CLIFF	322	-1																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																															
B747	EGLL	C 370																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
LFMN	366	R 390	20.51	20.55	21.05	21.13	87																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																
		T 370					497																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																
AZA452	SU	E 280 ▲	FRANE	RLP	ABB	CLIFF	312	0																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																															
EA30	EGLC	C 280																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
LIVT	280	R 280	20.45	20.54	21.19	21.27	74																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																
		T 280					446																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																
SLR2659	BE	E 330 ▼	DIK	MONDO	HR	VALDA	167	0																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																															
B737	DTMB	C 330																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
EBBR	330	R 330	20.57	21.00	21.16	21.20	73																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																
		T 330					430																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																
DLH4381	BE	E 240 ▶	MARGV	STR	TGO	91	15	72																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																															
B737	EDDS	C 330																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
LFPG	317	R 330	20.55	21.14	21.24	428																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																	
KLM475	BE	E 150 ▼	SPV	NEBUL	EXIDU	200	0	66																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																															
B747	LFPG	C 150																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
EHAM	150	R 260	20.37	20.54	21.06	415																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																	
		T 150																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
AZA844	SU	E 280 ▲	FRANE	RLP	BNE	SANDY	328	0																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																															
FK28	EGCC	C 280																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
LIML	280	R 280	20.49	20.59	21.29	21.35	69																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																
VROR		T 280	21.06.50	30 gauche	5 RM	414																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																	
IT435T	BE	E 240 ▶	MARGV	BLM	LFSB	110	0	75																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																															
EA30	LFSD	C 290																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
LFPO	290	R 290	20.53	21.14	21.14	446																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																	
AFR1024	BE	E 260 ▼	LND	FAMEN	EXIDU	LILAN	224	0																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																															
B757	LF55	C 260																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
EHAM	260	R 260	20.49	20.56	21.07	21.19	78																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																
		T 260					472																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																
SWR347	SU	E 220 ◀	HOC	HR	TRD	BRY	285	0																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																															
DC9	LFPG	C 260																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
LSZH	260	R 260	20.47	20.52	21.09	21.13	74																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																
		T 260					446																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																
SAB12	BE	E 330 ▼	DIK	MONDO	HR	VALDA	165	0																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																															
B747	LIML	C 330																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
EBBR	330	R 330	20.48	20.51	21.05	21.08	85																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																
		T 330					497																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																
SAR451	NO	E 310 ▶	TSU	CLM	MMD	DIK	78	0																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																															
B745	EHAM	C 310																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
LFPR	310	R 310	20.54	20.59	21.10	21.16	81																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																
VALDE		T 310	21.00.36	CFL 330	0 NM	481																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																	
AAL12	AL	E 330 ◀	TGO	STR	TRO	BRY	260	0																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																															
B767	KJFK	C 350																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
LOW	350	R 330	20.45	20.53	21.12	21.16	86																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																
		T 350					502																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																
IT43RE	SU	E 390 ▲	FRANE	RLP	BNE	SANDY	328	0																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																															
B747	EGKK	C 390																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
LIRR	390	R 390	20.54	21.02	21.27	21.32	87																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																
		T 390					495																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																
BAW445R	SU	E 310 ▲	FRANE	RLP	BNE	SANDY	318	0																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																															
DC9	EGKK	C 310																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
LIPU	310	R 310	20.42	20.51	21.19	21.25	74																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																
		T 310	21.00.36	0 NM		441																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																	
AFR1224	CE	E 310 ▲	BRY	CLM	BNE	SANDY	334	0																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																															
B747	EGGR	C 310																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
LFMN	310	R 310	21.00	21.03	21.17	21.22	81																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																
		T 310					480																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																
JETER																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																							
REPRENDRE																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																							
20:59.00																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																							

Les alarmes définies dans le paragraphe précédent, et distinguées selon la couleur du plot de l'avion sur la vue radar sont affichées explicitement. Elles sont désignées par les acronymes (cf. figure III-7) :

- SFNT pour le filet de sauvegarde (SaFety NeT, sur fond rouge),
- WCFL pour CFL non respecté (Warning CFL, sur fond violet),
- WRDO pour appel pilote (Warning RaDiO, sur fond violet) (l'alarme déclenche 1 minute avant le passage de l'avion sur sa balise d'entrée dans le secteur),
- VTFR pour Vol à TransFéRer, sur fond violet ou rouge s'il apparaît un problème de coordination (l'alarme déclenche 1 minute avant le passage de l'avion sur sa balise de sortie du secteur).

En plus de ces alarmes, deux indications supplémentaires sont affichées pour informer le contrôleur que le RFL et le TFL sont différents du CFL, c'est-à-dire que le plan de vol n'est pas respecté. Les indications sont signalées par l'encadrement de ces niveaux.

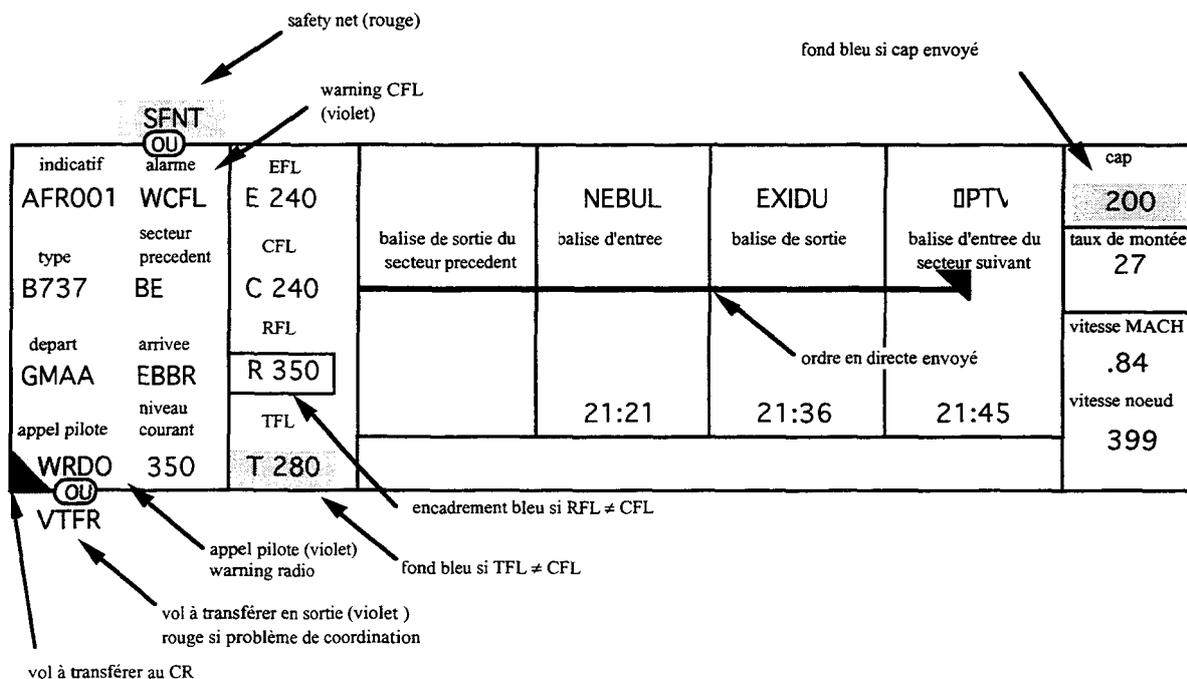


Figure III-7 : Strip

Les ordres peuvent également être envoyés à partir de la vue strip par sélection de l'élément à modifier, et par choix d'une nouvelle valeur sur un menu déroulant.

Dans les situations assistées par un outil d'aide, les informations relatives à la partageabilité et à l'allocation sont indiquées par la couleur du strip. Lorsqu'un conflit est partageable, SAINTEX indique sur le strip la proposition de résolution. S'il s'agit d'une résolution en niveau, les informations présentées sont le nouveau niveau à ordonner et l'heure d'envoi d'ordre. Dans le cas d'une résolution en cap, sont présentés l'heure d'envoi d'ordre, la déviation, et la distance minimale de séparation entre les aéronefs.

Ainsi, par ces informations, le contrôleur connaît la résolution proposée par SAINTEX, dès l'entrée de l'un des avions en conflit dans le secteur. Le contrôleur peut de cette façon évaluer la proposition de celui-ci en fonction de ses plans et décider de l'allocation du conflit.

Sur ce point, le dilemme suivant est apparu :

- choisir de donner la proposition de résolution de SAINTEX très tôt même si la résolution n'est pas optimale,
- choisir de donner une proposition de résolution plus fine, mais ajustée en temps réel, donc évoluant dans le temps.

Du point de vue de la coopération homme-machine, il apparaît préférable de signaler rapidement les propositions de SAINTEX, de façon à ce que le contrôleur puisse très vite évaluer cette proposition, ajuster ses tâches en fonction de celle-ci, et ne pas avoir à remettre en cause son choix. De plus, avec un outil d'aide simple comme SAINTEX, une formation rapide permet au contrôleur de comprendre comment l'outil calcule ses résolutions. De ce fait, la lecture de la proposition de SAINTEX ne fait que confirmer ce que le contrôleur avait prévu. Ce principe entraîne un gain de temps puisque non seulement le contrôleur a moins besoin de surveiller le conflit, mais il a davantage la possibilité d'intégrer, de suite les actions de SAINTEX, dans son plan.

2.1.4. Interfaces de communication complémentaires

Le strip offre un support de communication entre le contrôleur organique et le contrôleur radar, ce moyen offre l'équivalent des annotations qu'ils emploient sur leur poste seul. Six symboles selon quatre couleurs sont disponibles, et leur permettent de marquer les niveaux, les balises et le cap. De même, l'indicatif et les aéroports peuvent être soulignés. Les contrôleurs disposent également d'un système de désignation des vols sur les deux vues des deux postes, qui consiste à dessiner en vert le vol désigné. Les éléments marqués ou désignés sont identiques sur les deux postes de contrôle. Cette possibilité constitue une aide graphique à la coopération homme-homme. Il est important de noter qu'aujourd'hui les contrôleurs travaillent côte à côte sur un même écran radar et un même tableau de strips. Les communications gestuelles occupent donc une place importante de leur activité. C'est pourquoi il est important de les faire transparaître sur l'interface, ce qui a aussi l'avantage de pouvoir être enregistré.

2.2. Les outils d'aide pour la répartition dynamique des tâches de contrôle

2.2.1. L'outil d'aide au niveau tactique, SAINTEX

Du point de vue de la *détection de conflits*, SAINTEX impose de ne considérer que des routes directes entre deux balises consécutives, ce qui introduit la contrainte de routes directes entre l'entrée et la sortie du secteur. SAINTEX n'est capable de prendre en charge que les conflits respectant les configurations suivantes : conflit entre deux avions stables en cap et en niveau, ou entre un avion stable en cap et en niveau, et un avion dont le niveau courant est différent de son niveau de transfert (cf. Chapitre II § 5.2). Cette deuxième possibilité constitue une extension intégrée à SAINTEX en vue, d'une part d'améliorer le réalisme des situations de contrôle, et d'autre part d'augmenter le nombre de conflits partageables.

Les conflits que SAINTEX est capable de prendre en charge sont isolés du reste du trafic, c'est-à-dire qu'aucun avion ne pénètre dans le volume de résolution des deux avions en conflit. Ce volume est défini dans chacune des configurations de conflits. Dans la première configuration (deux vols stables en cap et en niveau), il est constitué d'un cercle de quarante milles nautiques, centré au point de croisement des trajectoires et de deux triangles délimités par les tangentes au cercle et les balises d'entrée et de sortie. Dans la seconde configuration de conflits, le volume est défini par la tranche de niveaux bornée par les valeurs minimum et maximum des différents

niveaux (niveau courant, CFL, RFL, TFL) plus le niveau d'entrée si l'avion n'est pas encore dans le secteur.

Enfin, un conflit est partageable si par définition il peut être résolu indifféremment par le contrôleur ou SAINTEX, et si l'agent à qui il va être alloué (ou réalloué) dispose du temps disponible suffisant pour le traiter. Ce temps disponible est traduit en distance fixée à une cinquantaine de nautiques des balises d'entrée des avions impliqués.

Dans le cadre de nos expérimentations, un conflit est défini comme un rapprochement sous une distance minimale de séparation valant huit mille nautiques dans la première configuration de conflits (avions stables en niveau), et douze dans la seconde (impliquant un avion évolutif).

La résolution des conflits s'effectue à l'intérieur du secteur. En particulier, cela signifie que la date d'envoi d'ordre est ultérieure à la date de franchissement de la balise d'entrée de chaque avion impliqué dans le conflit (Lemoine, 94).

Les déviations en cap sont paramétrées par une date et un angle de déviation. Les facteurs pris en compte pour obtenir ces déviations sont l'ordre de passage des vols au point de croisement des trajectoires, l'angle formé par les trajectoires, le rapport des vitesses entre les aéronefs ... Une résolution en niveau est une modification de niveau, ordonnée immédiatement après l'entrée du vol dans le secteur, vers le niveau de transfert.

2.2.2. L'outil d'aide au niveau stratégique, PLAF

2.2.2.1. Assistance à l'évaluation de la charge du contrôleur radar

Les informations et événements présentés sur l'interface de PLAF, permettent au contrôleur organique d'évaluer la charge du contrôleur radar et, par conséquent, de définir un partage de tâches évitant des situations surchargées, tout en respectant les contraintes du trafic. En effet, pour évaluer et gérer la charge de travail du contrôleur radar, l'interface présente une prédiction des vols qui vont entrer dans le secteur contrôlé, des conflits qui risquent d'apparaître, puis en situation explicite assistée, une prédiction des surcharges de travail. Les conflits partageables sont désignés, de façon que le contrôleur organique puisse réguler la charge de son collègue contrôleur radar par des allocations de conflit à SAINTEX.

Cette assistance se présente sous la forme d'une interface affichant une prévision du trafic (cf. figure III-8). Initialement destinée au contrôleur organique, cette interface a néanmoins été placée entre les deux contrôleurs, afin de disposer également du jugement du contrôleur radar. Elle présente, sous une forme différente, les informations présentées sur les interfaces standards.

Le trafic est présenté sur un horizon de quarante cinq minutes débutant à la date courante. Chaque vol est représenté par un segment horizontal borné par les estimées des balises d'entrée et de sortie. Ces segments sont libellés par l'indicatif du vol et comportent les noms des balises d'entrée, de sortie et suivante. Sur l'écran, les avions sont classés par niveaux croissants. Ne sont affichés que les niveaux où des avions sont présents. Enfin, un avion évolutif change de niveau depuis son niveau initial jusqu'à son niveau ordonné.

Cette interface présente également deux types d'événements. Les premiers, mis en évidence par l'indication des différences de niveaux ordonnés, requis et de transfert, sont des événements auxquels le contrôleur radar doit faire face, s'il en a la possibilité. Ainsi, si le niveau ordonné est différent du niveau requis, le contrôleur radar, dans la mesure où cela n'entraîne pas de problèmes, devra ordonner ce niveau de transfert afin de satisfaire les contraintes du plan de vol relatif au secteur contrôlé.

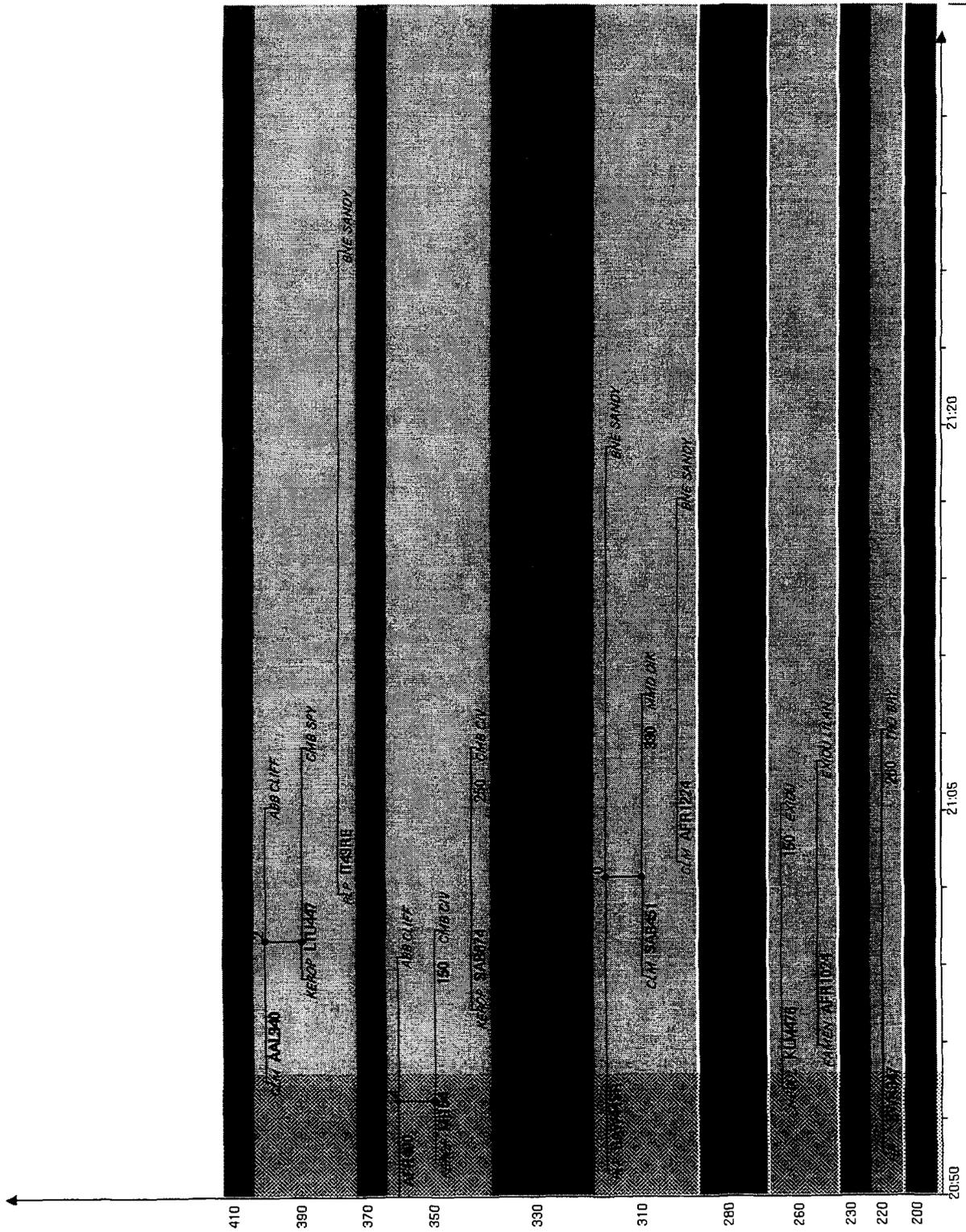


Figure III-8 : Interface PLAF

Les seconds, correspondant aux conflits potentiels entre couples d'avions sont représentés par un segment vertical qui relie les deux avions. La position de ce segment indique la date d'entrée sous la distance minimale de séparation, distance indiquée au-dessus du segment (figure III-8). Quatre types d'interactions sont indiquées par quatre couleurs différentes : les conflits correspondant à un conflit partageable et alloué au contrôleur radar les conflits alloués à SAINTEX, les conflits non partageables et enfin les interactions qui peuvent se produire en cas de modification de niveau des avions impliqués. Ce dernier type d'interactions n'est pas en soi un conflit, mais attire simplement l'attention dans les actions à mettre en œuvre pour respecter les contraintes imposées par les plans de vols des avions impliqués.

2.2.2.2. Allocation initiale

Le troisième type d'éléments apparaissant sur l'interface de PLAF concerne la répartition initiale des conflits et l'évaluation de la charge de travail du contrôleur radar.

Les conflits alloués par PLAF respectent la présentation choisie sur les écrans radar strip et radar pour les conflits partageables et alloués. Ces allocations sont justifiées par les surcharges déterminées par PLAF. Les surcharges, correspondant aux ensembles strictement intolérables, sont des intervalles de temps représentés par des zones rouges translucides sur l'ensemble des vols (cf. figure III-8, intervalle temporel entre 20h50 et 20h55). Deux types de surcharges sont représentées : celles que PLAF est capable de lever par une allocation de conflit à SAINTEX, et celles qui ne peuvent être réduites par un tel moyen. Dans ce dernier cas, PLAF indique aux contrôleurs que d'autres moyens doivent être mis en œuvre pour réduire la surcharge.

2.3 Architecture et organisation logicielle de la plate-forme.

Le logiciel se découpe en trois modules généraux : l'un comprend le simulateur de trafic, le second les outils d'aide SAINTEX et PLAF, et enfin le troisième gère les interfaces. Ces modules sont répartis sur trois stations de travail : une VAX 4000 modèle 60, une VAX 4000 modèle 90 et une VAX 3000 modèle 300 (cf. figure III-9). Cette architecture logicielle a été définie pour assurer une compatibilité avec l'architecture logicielle du banc de test des futures positions de contrôle, appelé HEGIAS, développé par le Centre d'Étude de la Navigation Aérienne (CENA). Les interfaces standards (vue strip et vue radar) apparaissent sur deux terminaux X double têtes. L'interface PLAF est affichée sur l'écran de la station VAX 3000.

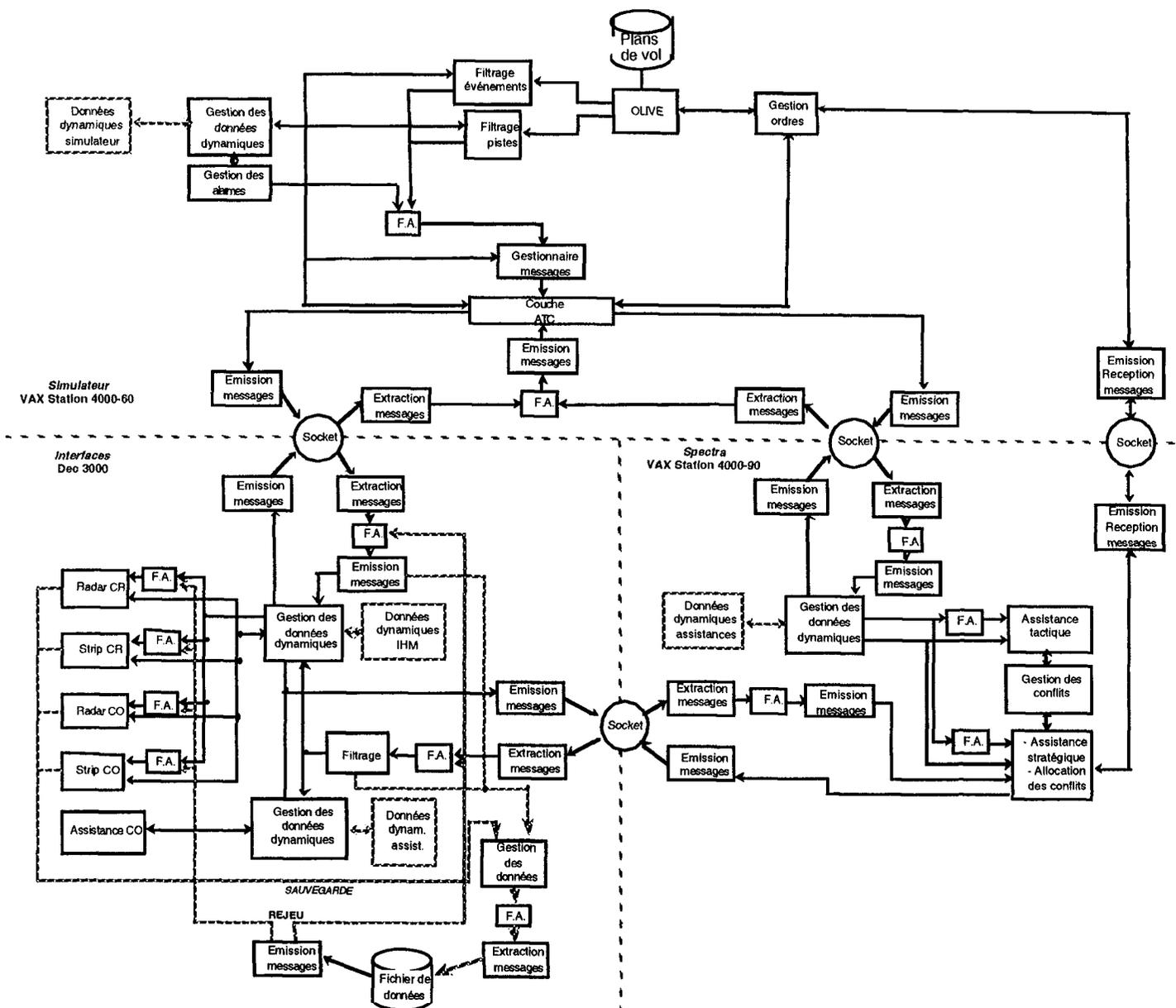
Les interfaces sont développées sous X-Windows. La communication entre les modules informatiques est assurée par des sockets développées avec UCX (produit qui émule UDP sous VMS).

Toutes les évolutions et les actions sur les interfaces sont enregistrées sur fichiers pour être rejouées et analysées après les passations.

L'ensemble de ces trois modules représente environ 48000 lignes développées en ADA par trois personnes, sur une durée de développement de deux ans.

Les aspects techniques de la plate-forme étant présentés, la partie suivante propose une description du protocole expérimentale, c'est-à-dire la démarche expérimentale qui permet de conduire à l'évaluation des outils d'assistance proposés.

Figure III-9 : Architecture de SPECTRA V2



3. Protocoles expérimentaux

La plate-forme expérimentale, complétée d'un protocole adéquat présenté maintenant, nous a permis de vérifier la validité des hypothèses suivantes. Deux situations s'attachent respectivement à chacun des objectifs, c'est-à-dire d'une part l'évaluation du principe de gestion externe par le contrôleur organique de la répartition des conflits entre le contrôleur radar et SAINTEX, et d'autre part de l'assistance fournie par PLAF. Une troisième situation de référence sans aide, proche de la situation actuelle du contrôle, permet de mesurer le gain apporté par chacun des objectifs. L'organisation des expérimentations est ensuite détaillée. De nombreuses précautions ont été prises pour que la validité écologique de l'expérimentation soit respectée. Puis un paragraphe est consacré à la description des données enregistrées pour analyser le comportement des contrôleurs vis-à-vis des deux systèmes d'aide.

3.1. Situations expérimentales

Trois situations expérimentales ont été conçues afin de permettre l'évaluation des outils d'aide proposés. La première, sans assistance, sert de situation de référence. La situation explicite intègre l'outil d'aide tactique, SAINTEX. La dernière, la situation explicite assistée, comporte en supplément de la situation explicite un module de répartition de tâches qui assure l'allocation d'un conflit partageable à SAINTEX quand la charge du contrôleur radar le justifie.

Les trois situations expérimentales ont été soumises à trois paires de contrôleurs certifiés (organique et radar) du Centre Régional de la Navigation Aérienne Est situé à Reims où la plate-forme expérimentale a été transportée. Trois scénarios similaires (dans le secteur familier aux opérateurs) ont été conçus et vérifiés par un contrôleur conseil. L'expérimentation débute par une phase de familiarisation, suivie des passations (les expériences proprement dites), puis des réponses aux questionnaires et autoconfrontations.

Les évaluations reposent sur l'étude des passations et autoconfrontations obtenues de chaque contrôleur après chacune des expérimentations enregistrées informatiquement (trafic et actions) et sur disques numériques (verbalisations).

3.1.1. Situation sans aide

La situation expérimentale sans aide sert de situation de référence (cf. figure III-10). Aucune assistance n'est fournie aux contrôleurs. Bien que proche d'une tâche de contrôle réelle, plusieurs différences l'en distinguent :

- la non communication avec les secteurs adjacents (tâche supprimée de l'activité du contrôleur organique),
- la non communication avec les pilotes (tâche supprimée de l'activité du contrôleur radar),
- le stripping électronique (puisque dans la réalité les strips sont imprimés sur papier),
- la mise en place d'un tableau de strips sur écran face à chaque contrôleur (aujourd'hui le tableau de strips est commun),
- la mise en commun d'outils facilitant la gestion du trafic (alarmes) et la communication homme-homme.

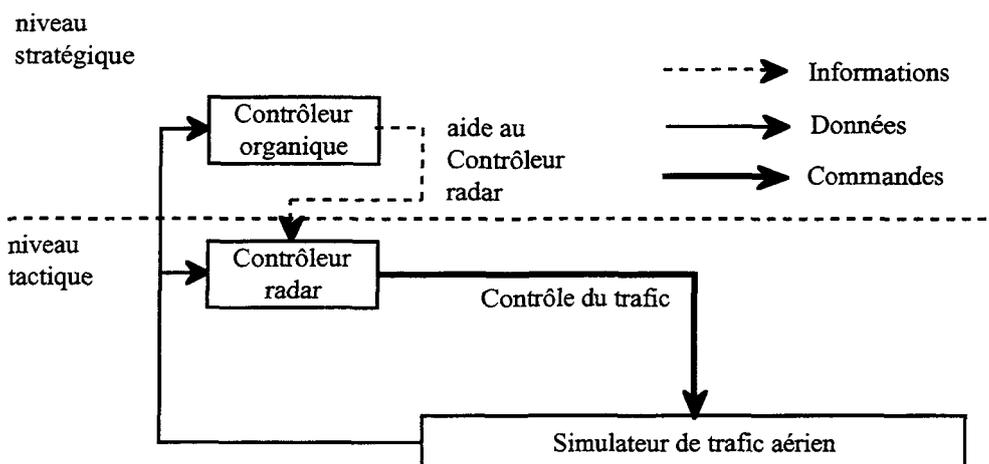


Figure III-10 : Situation sans aide

3.1.2. Situation explicite

L'hypothèse testée expérimentalement lors du mode de répartition explicite (cf. figure III-11) est relative à la gestion de la répartition externe des conflits partageables entre le contrôleur radar et SAINTEX. Le répartiteur peut être piloté soit par le contrôleur organique, soit par le contrôleur radar. Les conflits partageables sont préalloués au contrôleur radar. Ils peuvent être réalloués par les contrôleurs à condition de respecter les contraintes temporelles de SAINTEX. Les outils d'assistance fournis sont SAINTEX et la prédiction du trafic et des conflits par PLAF.

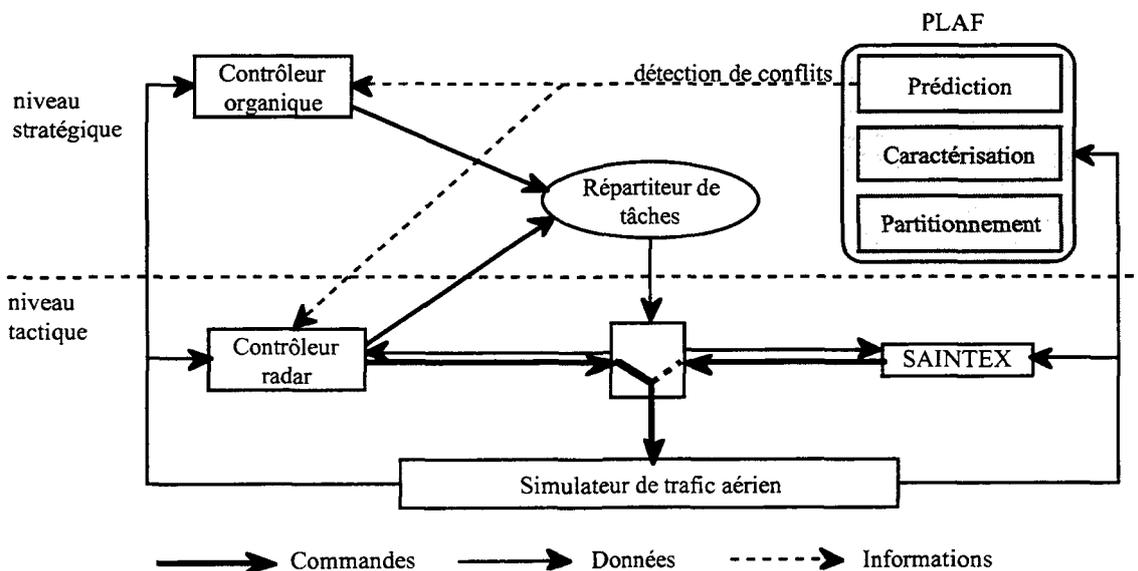


Figure III-11 : Situation explicite

3.1.3. Situation explicite assistée

La situation expérimentale du mode de répartition explicite assistée (cf. figure III-12) permet d'évaluer l'apport de l'aide stratégique de PLAF, c'est-à-dire la prédiction des périodes de surcharge de travail du contrôleur radar et l'allocation des conflits partageables lors de surcharge. Les conflits peuvent être réalloués par le contrôleur organique au contrôleur radar ou à SAINTEX, à condition de respecter les contraintes temporelles de SAINTEX.

Il est important de souligner que dans cette situation expérimentale, le contrôleur radar n'a plus d'accès direct à l'allocation. Les conflits partageables sont préalloués par PLAF soit au contrôleur radar, soit à SAINTEX (s'il y a détection de surcharge et disponibilité de conflits partageables).

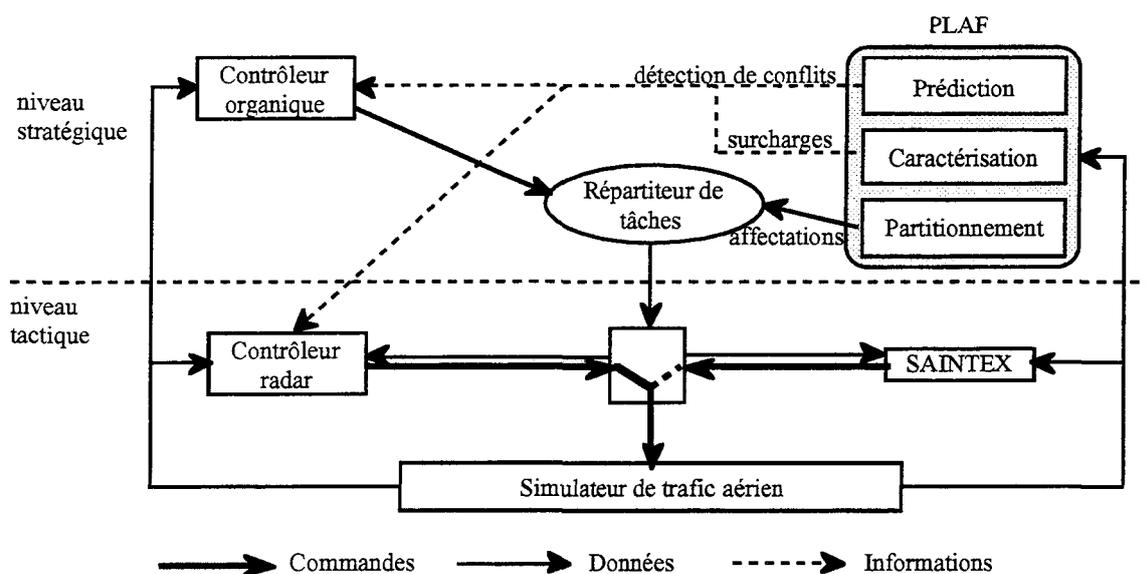


Figure III-12 : Situation explicite assistée

3.2. Plan d'expérience

3.2.1. Phase de familiarisation

La phase de familiarisation est nécessaire avant toute manipulation sur la plate-forme, afin que celle-ci soit utilisée au maximum de ses potentialités. Au cours de cette phase, il faut associer à l'utilisation des deux outils, des consignes de communications entre les deux contrôleurs (Gaillard, 95). Cette insertion de consignes de communication fait partie intégrante de la formation des jeunes contrôleurs. Il est donc important de continuer cette incitation à la communication lors de l'intégration de nouveaux outils.

Une phase de familiarisation d'une demi-journée précède chaque expérimentation sur un couple de contrôleur. Elle consiste en une présentation des principes de l'expérimentation sur la coopération homme-machine, puis en une description du secteur à contrôler, du type de trafic, et des moyens de contrôle. Le secteur utilisé pour les expérimentations est connu des contrôleurs de par leur travail, mais ils le contrôlent rarement dans sa globalité.

Une consigne initiale et générale présente le déroulement des expériences et de ses différentes phases (familiarisation, passations, résumés, autoconfrontations, questionnaires).

Après la présentation conceptuelle et fonctionnelle des expérimentations, suit une phase de formation à la plate-forme et aux outils d'assistance. Trois scénarios de démonstration ont été construits de façon à mettre en évidence chaque particularité des situations expérimentales. Un premier scénario de très faible trafic positionne les opérateurs en phase de contrôle de façon à les familiariser aux vues strip, radar et PLAF, aux outils de contrôle, et à l'organisation du travail imposée par la plate-forme. Un deuxième scénario de faible trafic permet de vérifier si les contrôleurs réussissent à utiliser la plate-forme. Enfin, un troisième scénario de fort trafic impose aux contrôleurs d'utiliser les outils d'assistance afin de mettre en place des stratégies de coopération et de contrôle. Cette phase de familiarisation essaie d'être la plus exhaustive possible de façon à éviter toute intervention des expérimentateurs durant les passations.

3.2.2. Déroulement des évaluations

Pour contrebalancer les effets d'ordre, dus notamment à l'apprentissage et à la fatigue, le plan d'expérience (Tableau III-1) prévoit l'utilisation de trois scénarios (scénario 1 à scénario 3). Les trois situations expérimentales (SA : sans aide, EX : explicite, EA : explicite assisté) sont croisées avec les trois scénarios, de telle sorte qu'une combinaison "situation expérimentale" et "scénario" n'apparaisse qu'une fois sur le protocole.

	1er couple	2ème couple	3ème couple
1ère passation	SA * scénario 1	EX * scénario 3	EA * scénario 2
2ème passation	EX * scénario 2	EA * scénario 1	SA * scénario 3
3ème passation	EA * scénario 3	SA * scénario 2	EX * scénario 1

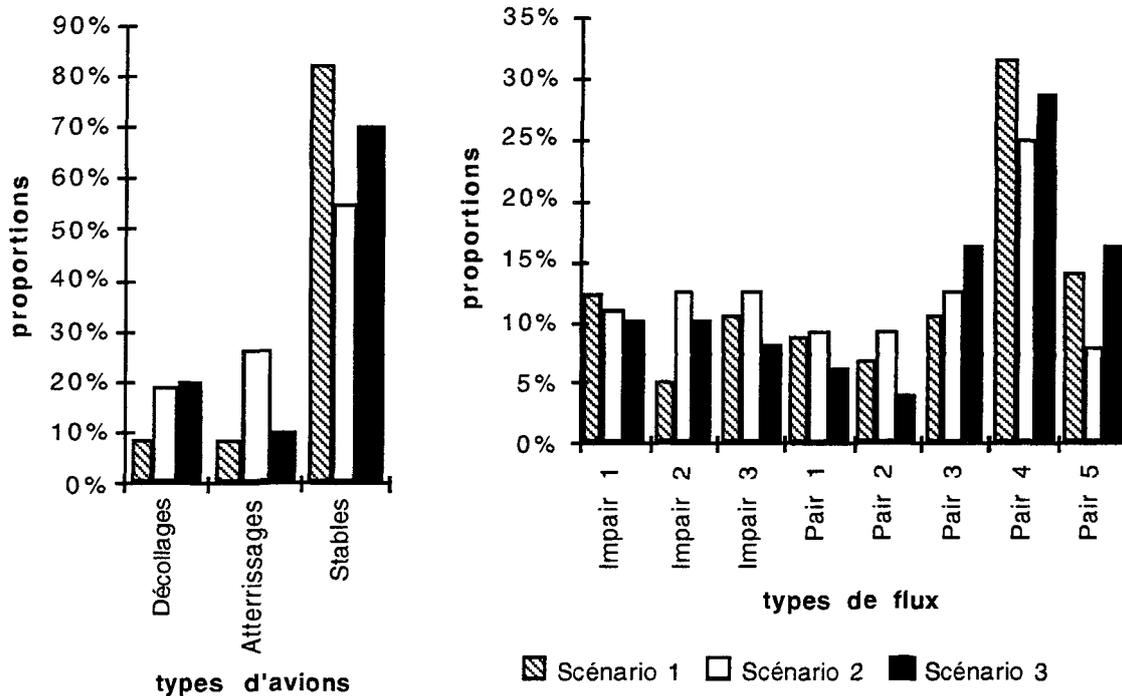
Tableau III-1 : Plan d'expérience.

Après chaque passation, l'évaluation se déroule de la façon suivante : le contrôleur organique répond au questionnaire dédié à l'expérience à laquelle il vient de participer, pendant que le contrôleur radar participe à une autoconfrontation. L'autoconfrontation d'un sujet à un scénario est une procédure durant laquelle le scénario, que le sujet vient de réaliser, est rejoué, de façon à ce que le sujet commente, explique, la raison pour laquelle à un moment précis, il a décidé de faire cette action et non une autre (Hoc, 94). Puis le contrôleur organique participe à une autoconfrontation, alors que le contrôleur radar répond au questionnaire.

3.2.3. Élaboration des scénarios

Afin de ne pas ajouter de nouveaux facteurs dont nous n'aurions pas la maîtrise, nous avons tenté de construire des scénarios semblables. Les scénarios utilisés lors de l'évaluation comprennent environ soixante avions de tout type (au décollage, à l'atterrissage, stables), plusieurs conflits partageables (6) et non partageables (30). Les scénarios, d'une durée moyenne de 1h30, présentent deux niveaux de charge de trafic (donc de travail), un premier qui peut être qualifié de moyen, suivi d'un second plus fort. Le nombre de vols est nettement supérieur au nombre autorisé en situation réelle. Les vols varient en trajectoire, définie par les balises, et en niveau de vol. Les vols évoluent en flux qui représentent des regroupements de route aérienne ayant en commun une direction générale et un lieu géographique. Le secteur concerné, secteur nord-est de la France contrôlé par le Centre de Contrôle en Route de Reims, est composé de cinq flux en niveaux pairs et trois flux en niveaux impairs (cf. figure III-13).

Les proportions entre avions stables et avions évolutifs, et de flux entre niveaux pairs et impairs sont présentés sur les histogrammes III-1.



Histogrammes III-1: Différences entre scénarios

Pour construire un scénario, la principale difficulté est l'insertion de conflits. Deux types de conflits sont rencontrés : les conflits entre deux avions stables, et les conflits présentant un ou deux avions évolutifs.

Un conflit entre deux avions stables apparaît sur les points de croisement des flux en niveaux pairs et sur les points de croisement des flux en niveaux impairs. Quatre zones de conflits sont a priori identifiées : l'intersection des flux pairs 4 et 3 vers Cambrai, l'intersection des flux pairs 2 et 4 vers Margy, l'intersection des flux impairs 1 et 2 vers Strasbourg, puis l'intersection des flux pairs 1 et 4 vers Ixilu. De ce point de vue, les scénarios présentent des difficultés identiques.

Un conflit comprenant au moins un avion évolutif est difficilement identifiable car la date à laquelle le vol va changer de niveau est dépendante du contrôleur.

Les scénarios ont été validés par un contrôleur conseil du centre de contrôle de Reims afin de s'assurer du réalisme des routes et du trafic utilisés.

3.3. Recueil de données

3.3.1. Données numériques

Les données enregistrées sont les ordres envoyés, les recherches d'informations et les marquages d'informations effectués par les contrôleurs au moyen des outils fournis par les interfaces, l'évolution du trafic (positions et caractéristiques des avions issus du simulateur), de même que les informations fournies par SAINTEX et PLAF.

Toutes ces données sont enregistrées sur fichiers de façon à être exploitables pour le rejeu des passations nécessaire aux autoconfrontations.

3.3.2. Questionnaires

Les questionnaires soumis aux contrôleurs ont été adaptés de la première étude (Debernard, 93), en vue de prendre en compte les nouveaux objectifs. Ils font l'objet d'une analyse spécifique relative aux hypothèses de ces expérimentations.

Les questionnaires constituent une base de discussion et de réflexions sur les thèmes abordés. Ils ont pour objet de susciter chez les contrôleurs un certain nombre de réactions autour du thème général de la coopération homme-machine dans leur travail, thème bien évidemment au centre de nos préoccupations. Néanmoins, l'ouverture des questionnaires et la liberté laissée aux contrôleurs dans leurs réponses nous permettront également d'en retirer des informations générales sur leur travail.

Les questionnaires portent sur (voir annexe 1) :

- les erreurs et les risques,
- la charge de travail,
- la répartition des conflits,
- la qualité de la situation et des interfaces classiques (radar et strip),
- l'assistance à la résolution de conflit,
- l'interface de PLAF.

3.3.3. Verbalisations

A l'aide de disques numériques, nous avons enregistré trois types de verbalisations : celles issues des passations, des autoconfrontations, puis des questionnaires. Les deux dernières sont individuelles. Durant les passations, se sont les échanges verbaux contrôleur-contrôleur qui sont enregistrés. Ces enregistrements verbaux sont ensuite transcrits pour servir de support d'analyse.

4. Analyse des données objectives et subjectives

4.1. Variables de performance

4.1.1. Performance globale

Il est très difficile de trouver des critères de performance. Il est en effet impossible d'évaluer la performance en temps réel puisqu'aucun modèle de vol n'est disponible. Plusieurs paramètres définissent un vol et peuvent être très subjectifs, comme le type de compagnie aérienne. Certaines compagnies privilégient le confort des passagers, d'autres privilégient le temps de transit. De même, les contrôleurs prennent davantage de précautions avec les compagnies étrangères, surtout celles dont les pilotes ne parlent pas l'anglais, ou mal, car les ordres donnés par les contrôleurs ne sont pas toujours bien compris ou même appliqués. Ainsi, un modèle d'avion seul ne suffit pas. Cependant deux critères ont été retenus, le temps de transit et la

consommation des aéronefs. Nous avons supposé que, dans le cadre des expérimentations, du fait qu'il n'y ait pas de contact radio avec les pilotes, les contrôleurs n'ont pas fait de distinction entre les compagnies.

Les méthodes de calcul de ces critères sont présentées ci-après :

4.1.1.1. Calcul de la consommation en fonction des niveaux de vol :

Les contrôleurs considèrent que, pour une différence d'altitude de 1000 pieds, la consommation augmente de 3%. Pour chaque scénario, les résultats des passations sont comparés aux résultats d'une passation de référence. Durant la passation de référence, les vols respectent les RFL et TFL mais n'évitent pas les conflits. Le vol est mis à son RFL à l'assume (réponse à l'appel pilote), et à son TFL à l'apparition de l'alarme VTRF (vol à transférer).

Les résultats présentés figure III-14, indiquent pour chaque passation le rapport entre la consommation réelle des avions, et la consommation théorique du scénario concerné. Les résultats sont classés par colonne en fonction de la situation expérimentale.

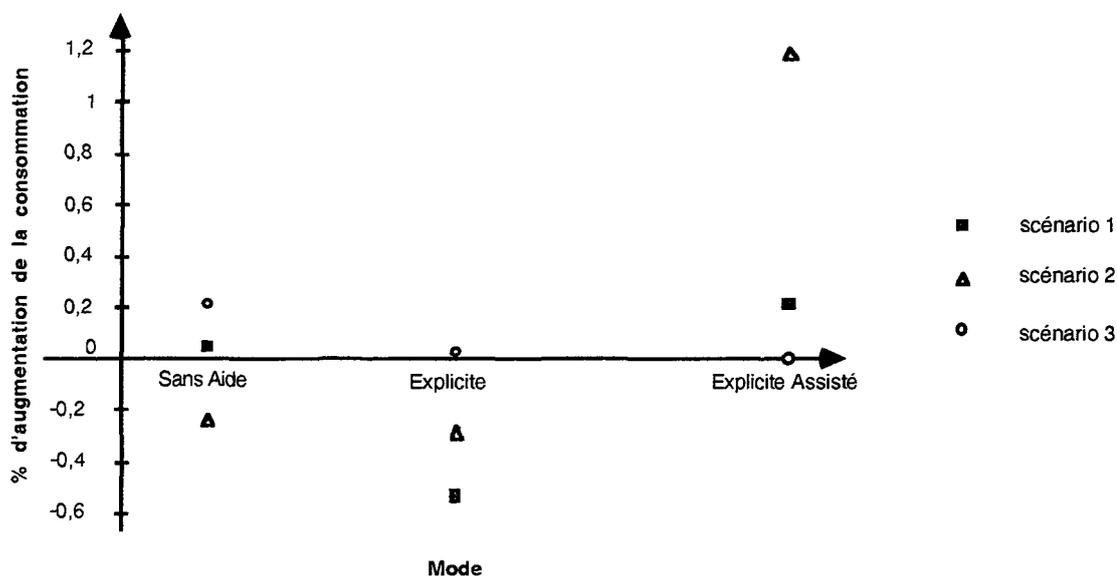


Figure III-14 : Relation entre consommation de carburant et situation expérimentale

Une détérioration minimale en situation explicite assistée est relevée, mais seulement pour deux scénarios.

4.1.1.2. Calcul du temps de transit :

Le temps de transit est le temps mis par un vol entre sa balise d'entrée et sa balise de sortie. La situation de référence laisse évoluer les avions suivant la route prédéfinie, donc sans éviter les conflits.

Les résultats présentés figure III-15, indiquent pour chaque passation le rapport entre le temps de transit réel des avions, et le temps de transit théorique du scénario concerné. Les résultats sont également classés par colonne en fonction de la situation expérimentale.

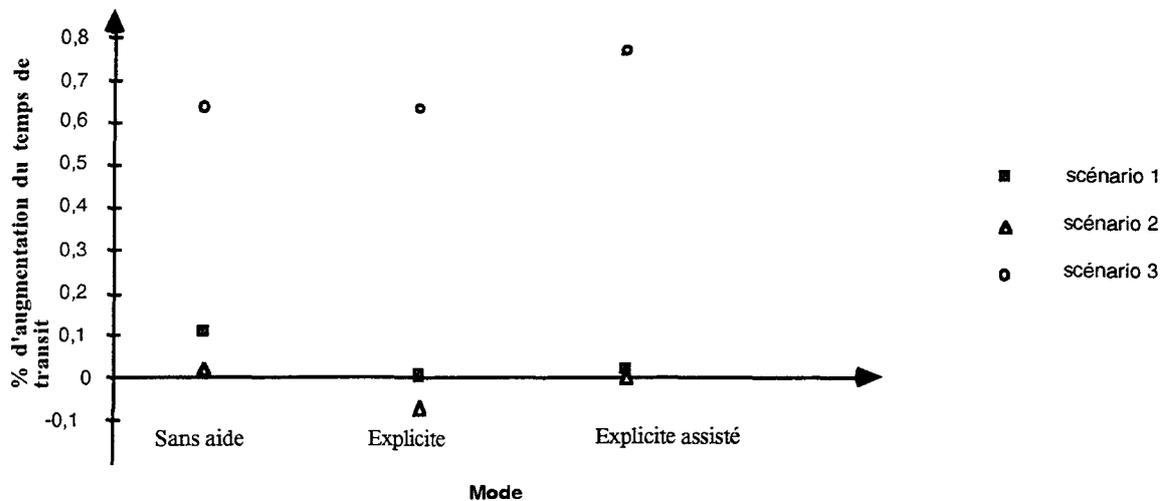


Figure III-15 : Relation entre temps de transit et situation expérimentale

L'analyse du graphique concernant l'évolution du temps de transit montre que la différence repose davantage sur le type de trafic que sur la condition expérimentale.

Les résultats obtenus ne permettent pas de conclure à des différences de performance importantes entre les situations expérimentales selon ces critères. En fait, la charge de travail et la quantité de trafic sont telles que les contrôleurs ne cherchaient pas à optimiser les routes des avions. Leur principal objectif était d'éviter les conflits. Les contrôleurs positionnaient les avions sur un niveau de vol non pas pour réduire sa consommation de carburant, mais pour éviter un conflit présent ou pour s'assurer que cet avion ne leur posera pas de problème durant sa traversée. De plus, pour les mêmes raisons, les niveaux de vol demandés par les pilotes (RFL) et les niveaux de transfert n'étaient pas respectés.

4.1.2. Analyse des erreurs des contrôleurs

Les scénarios sont construits de façon à augmenter la charge de travail des contrôleurs et à les inciter à utiliser les outils d'assistance mises à leur disposition (environ 60 avions par heure). Mais les contrôleurs aériens sont très performants et, même sans aide, ont commis très peu d'erreurs. Les erreurs considérées correspondent à des violations de la norme de séparation. Cette erreur ne conduit pas à une procédure de dépôt de plainte. En France, par an, pour deux millions de vols, cinq cents erreurs de ce type sont enregistrées, pour cinq ou six erreurs suivies d'enquête (alors appelées air-miss). Cependant l'analyse des erreurs apparues durant les passations montre que plus le degré d'automatisation est important, meilleure est la sécurité (cf. tableau III-2).

	1er couple	2ème couple	3ème couple
<i>Sans aide</i>	3	5	5
<i>Explicite</i>	2	2	4
<i>Explicite assisté</i>	1	0	4

Tableau III-2 : Nombre d'erreurs en fonction des conditions expérimentales

Les erreurs prises en compte dans ce tableau sont traduites comme telles par les contrôleurs. Les causes de telles erreurs sont multiples mais ne font pas l'objet de ce mémoire.

Ce premier résultat souligne l'intérêt de l'apport des outils d'aide. Ce résultat est confirmé par les analyses suivantes qui concernent tout d'abord l'analyse des commandes appliquées.

4.1.3. Analyse des commandes

L'analyse des commandes mises en œuvre par les contrôleurs (ordres aux pilotes) permet de faire apparaître quelles commandes ont été les plus utilisées, et avec quels objectifs. Ces informations proviennent de l'enregistrement informatique des commandes envoyées à partir des interfaces. Quant à leur objectif, il est évoqué par les contrôleurs durant les passations ou les autoconfrontations. Les commandes appliquées sont de deux types, le changement de cap et le changement de niveau. Les objectifs suivis par les contrôleurs sont le respect des plans de vol déposés par les compagnies et l'évitement des conflits.

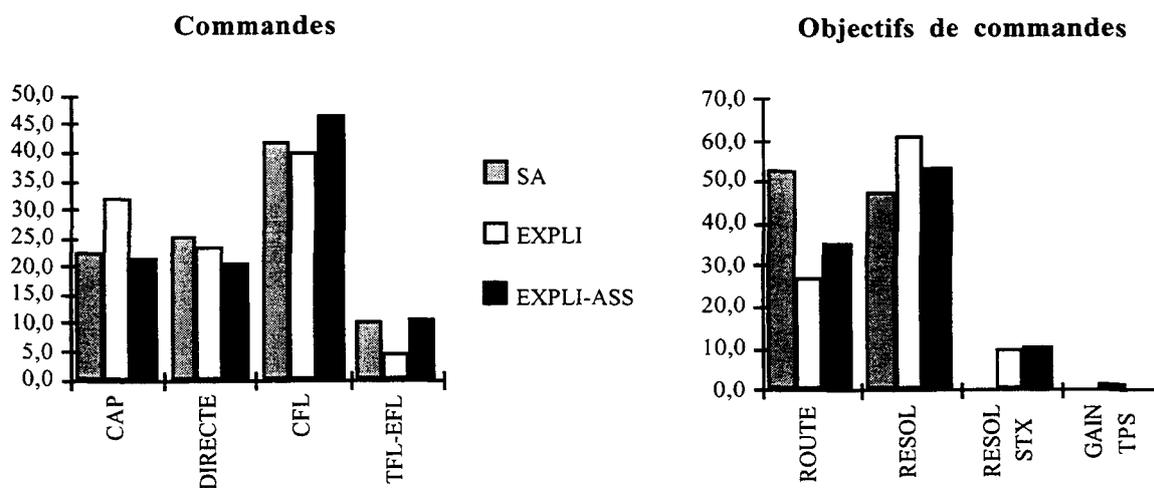
L'observation de la fréquence d'émission des ordres de déviations en cap ou directe relativement à l'utilisation des changements de niveau de vol, ainsi que leurs objectifs, font apparaître deux résultats.

D'une part, le fait que la proportion de déviation en cap ou directe est plus importante en situation explicite que dans les autres situations (55,6% en explicite contre 45,25% dans les autres situations) laisse supposer que, le contrôleur radar, étant plus impliqué dans les allocations, cherche davantage à connaître les commandes que SAINTEX va appliquer ou a appliquées. Puisqu'il sait où et comment SAINTEX agit, le contrôleur peut se permettre d'utiliser des déviations, principe de résolution qui, à l'opposé d'une résolution en niveau, ne fait pas interférer les avions détournés avec les avions contrôlés par SAINTEX.

De plus, proportionnellement plus d'actions de résolution sont relevées en situation explicite que dans les autres situations (61% en explicite contre 50,45%). Les contrôleurs donnent plusieurs actions de résolution avant de prendre l'ultime décision.

La situation explicite inciterait donc les contrôleurs radar à prendre davantage connaissance des interventions de SAINTEX pour élaborer leurs propres commandes. Cependant, cette façon de procéder entraîne les contrôleurs à envoyer plus d'ordres de résolutions, ce qui pénalise les vols en terme de consommation, de temps de transit et d'utilisation de la fréquence radio.

D'autre part, l'analyse de la fréquence d'utilisation des changements de niveaux de vol, l'objectif étant le respect du plan de vol (route), met en évidence que l'activité développée sans aide est moins planifiée (52,7% sans aide contre 31% dans les autres situations). En effet, dans cette situation les contrôleurs ont tendance à laisser évoluer le trafic, notamment en donnant des niveaux intermédiaires, avant de mettre l'avion sur la route demandée, de façon à disposer de plus de temps pour réagir sur les conflits en cours.



Histogramme III-2 : Les commandes et leurs objectifs

Ainsi, l'analyse des commandes souligne que les contrôleurs semblent adopter des stratégies différentes selon la situation expérimentale. Sans aide l'activité semble moins planifiée, et en situation explicite, les performances semblent moins bonnes. La suite des analyses, par la manipulation d'autres types de données, confirmeront ces suppositions.

4.2. Évaluations subjectives

4.2.1. Estimation de la charge de travail

Il était demandé au contrôleur radar d'évaluer sa propre charge de travail et au contrôleur organique d'évaluer la charge de travail du contrôleur radar. Les graphiques de la figure III-16 représentent les réponses des contrôleurs organique et radar. La réponse se fait au moyen d'une échelle présentée sur la vue radar qui apparaît toutes les cinq minutes. Il était demandé au contrôleur de répondre rapidement, en choisissant une case parmi les sept proposées (cf. Figure III-2 en bas à gauche).

Ces données démontrent que le contrôleur organique a une bonne représentation de la charge de travail du contrôleur radar. Il la surestime et l'anticipe mais la tendance est similaire.

Ces graphiques mettent en évidence que les scénarios évoluent suivant quatre zones de charge (cf. figure III-17). La phase ascendante (1) correspond au début du scénario et à l'entrée des avions dans un secteur vide, puis une phase sur laquelle le niveau de charge est moyen (2), ensuite une phase sur laquelle le niveau de charge est important (3), suivie d'une phase descendante (4) qui correspond à la fin du scénario et à la sortie des avions du secteur.

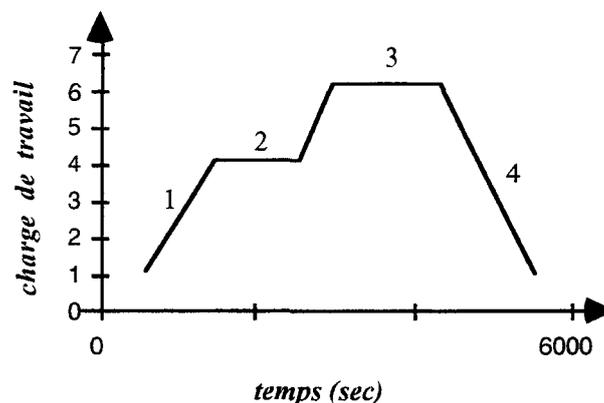
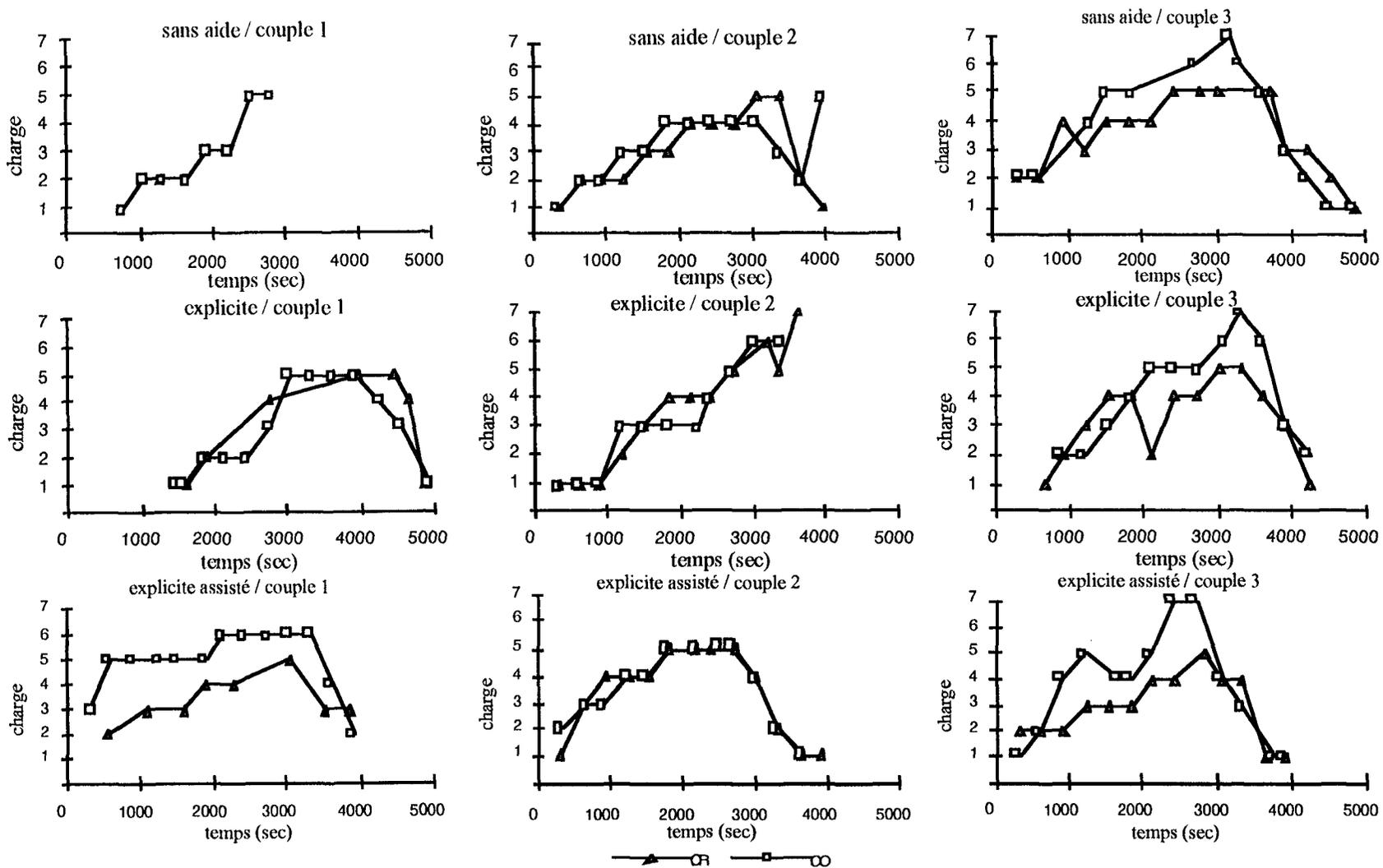


Figure III-17 : Distinction de quatre zones de charge de travail différentes, sur l'échelle subjective de 0 à 7.

La comparaison des phases 2 et 3 nous permettra de mettre en évidence l'effet de l'augmentation de la charge de travail sur l'activité des contrôleurs.

Sur certains graphiques, les points manquants sont dus soit à l'oubli des contrôleurs de choisir une case sur l'échelle, soit à l'arrêt de la passation à cause d'un problème logiciel.

Figure III-16: Charge de travail du contrôleur radar estimée par les contrôleurs radar (CR) et organique (CO)



4.2.2. Réponses à TLX (Task Load index)

TLX (Hart, 88) est une méthode subjective d'estimation de la charge de travail globale. Elle se compose de six descripteurs sémantiques :

- l'exigence mentale,
- l'exigence temporelle,
- l'exigence physique,
- la performance,
- l'effort,
- le stress.

Une définition de ces descripteurs et de leur utilisation est présentée en annexe 2.

Après chaque expérimentation, chaque contrôleur exprime la charge qu'il a perçue selon chacun des six descripteurs, en positionnant une croix sur une ligne horizontale. La position de la croix fournit une valeur entre 0 et 1 appelée D_i , i étant le numéro du descripteur. Il est ensuite demandé au contrôleur de préciser le descripteur qu'il estime prédominant dans chaque paire extraite des combinaisons des six descripteurs. C_i est le nombre d'apparitions d'un descripteur dans les choix du contrôleur.

La charge de travail globale se calcule alors avec la formule suivant :

$$WL = \sum_{i=1}^6 \frac{C_i}{15} \cdot D_i \quad \text{avec} \quad \begin{cases} WL \in [0, 1] \\ D_i \in [0, 1] \end{cases}$$

où C_i est la valeur du compteur correspondant au descripteur individuel i , et D_i est la charge évaluée pour le descripteur individuel i .

Les résultats construits à partir des réponses aux évaluations TLX nous ont permis d'étudier la relation la charge de travail et successivement les scénarios, les situations expérimentales, et les ordres de passage. L'objectif est de rechercher des facteurs de charge, et de disposer d'un nouveau moyen de comparaison des situations expérimentales. Aucune corrélation n'a pu être retrouvée sur ces données. Les raisons de cet échec peuvent provenir soit d'un effectif trop faible, soit d'une mauvaise formation des sujets à l'utilisation de TLX. De même, le nombre d'avions étant élevé, un phénomène d'homéostasie est apparu, c'est-à-dire que la charge de travail des contrôleurs ne diminuait pas mais se reportait sur d'autres tâches non assurées en cas de surcharge (par exemple la recherche de performance).

4.2.3. Réponses aux questionnaires

Ce paragraphe résume les résultats présentés dans le rapport final de la convention LAIH/CENA 91/C0008 de mai 1995, sur les réponses aux questionnaires (Crévits, 95). Ces résultats ont été synthétisés et sont présentés selon le réalisme, l'outil d'aide tactique SAINTEX et l'outil d'aide stratégique PLAF.

Réalisme de la situation expérimentale :

- du point de vue de *l'organisation du travail*, le découpage en fonctions et rôle imposé par l'expérience est validé. Le partage de tâches entre le contrôleur radar et le contrôleur organique est jugé conforme à la réalité par les contrôleurs. Une part importante de l'activité du contrôleur organique est en effet de détecter les conflits en entrée de secteur, et de les analyser. Il doit tenir compte de cette analyse pour réguler la charge de travail du contrôleur radar. Actuellement, il atteint cet objectif par négociation des plans de vol avec le contrôleur du secteur amont (modification de l'heure d'entrée du vol, ou de son niveau de vol). L'expérimentation a remplacé ce moyen de régulation par SAINTEX. Son rôle de

régulateur est donc respecté. D'autre part, puisque sa fonction peut aussi le conduire à proposer des stratégies de résolution de conflit, l'analyse des propositions de l'assistance tactique peut aussi entrer dans ses fonctions.

- du point de vue de la *tâche*, les contrôleurs soulignent la restriction des moyens de contrôle offerts et l'absence de certaines tâches, notamment :

- *Les méthodes de résolution de conflit* ont été modifiées puisque le simulateur ne permet pas au contrôleur de modifier les taux d'évolution, ni la vitesse de l'avion. Mais les cas de conflits demandant ce type d'ordre se sont avérés très rares et les contrôleurs n'ont donc pas été gênés.
- *Les tâches de coordination inter-secteurs* : premièrement, leur absence supprime un moyen de contrôle puisque les contrôleurs ne peuvent disposer d'un avion plus tôt par négociation avec le contrôleur organique du secteur amont (transfert anticipé). Deuxièmement, la charge de travail du contrôleur organique est fortement diminuée. Le point précédent a validé la possibilité fonctionnelle pour le contrôleur organique de piloter le répartiteur. Il reste à vérifier, si dans des conditions où le contrôleur organique a une charge de travail plus importante, il a la possibilité matérielle de continuer à assurer ce rôle.
- *La fréquence radio* : l'absence de communication contrôleur/pilote a deux répercussions. La première concerne la charge de travail du contrôleur radar qui est diminuée, non seulement par l'absence de la tâche, mais surtout par le fait qu'il n'y ait pas de contrainte temporelle. En effet, en position de travail réelle, le contrôleur radar a pour obligation de répondre instantanément à un appel pilote, donc d'abandonner une tâche en cours pour répondre à l'appel. Dans le cadre de l'expérimentation cette contrainte n'existe pas. Le contrôleur a davantage de facilité pour planifier son activité. L'inconvénient apporté est la non mémorisation de la route du vol lors de l'appel pilote. En effet, quand un pilote appelle, le contrôleur vérifie sa route en la lisant au pilote, et ainsi la mémorise. L'expérimentation n'oblige pas cette vérification.

La seconde répercussion est l'absence de contrôle mutuel, c'est-à-dire une surveillance du contrôleur radar par le contrôleur organique, par ses échanges verbaux avec les pilotes. Pour vérifier l'activité du contrôleur radar, le contrôleur organique doit rechercher d'autres informations (codage d'informations sur l'interface, commandes envoyées), ou le demander explicitement.

- *Les risques externes à gérer* (météorologie, panne, absence de réponses de pilotes) : l'absence de risques implique une simplification des tâches. Leur présence pourrait conduire à une remise en question de l'intégration de SAINTEX. Primo, celui-ci ne dispose pas encore des capacités nécessaires pour réagir sur des situations incidentelles. Secundo, en cas d'incident, le contrôleur serait dans l'obligation de contrôler les parties de trafic déléguées à l'outil et ces tâches supplémentaires le mettraient en état de surcharge alors qu'il doit répondre à une urgence.
- *Les zones militaires à éviter* : l'absence de zones militaires entraîne une diminution de la charge de travail du contrôleur organique puisqu'il n'a pas à négocier avec les contrôleurs militaires le passage d'avions sur leurs territoires. Mais, elle provoque aussi une simplification des tâches du contrôleur radar. Les zones militaires constituent en effet un obstacle à contourner lors des tâches de résolution de conflit, ou de respect des plans de vol.

- *Le manque de balises intermédiaires* : un plan de vol est normalement défini par plusieurs balises, les balises d'entrée et de sortie du secteur, mais aussi plusieurs balises intermédiaires. Ces balises peuvent ne pas être définies par un élément physique (une ville, un aéroport) mais être un point imaginé par les contrôleurs pour ajouter un point de contrôle sur lequel des conflits apparaissent fréquemment. Les balises intermédiaires constituent un moyen de contrôle de détection de conflit; leur absence entraîne une surcharge de travail car la surveillance concerne alors tout le secteur et pas seulement les points de contrôle.
- du point de vue des *scénarios*, les contrôleurs estiment que les échantillons de trafic qui leur sont soumis altèrent très peu le réalisme des routes et des flux. Quelques erreurs se sont glissées sur l'utilisation de certaines routes (routes inhabituelles, routes comportant plus d'avions qu'à la normale, vols ne respectant pas leur niveau de vol habituel), mais les contrôleurs les ont très vite détectées et intégrées.
- du point de vue des *interfaces*, les contrôleurs reconnaissent une amélioration de la qualité de leur travail due aux nouvelles possibilités, une fois qu'ils ont l'habitude de les utiliser. Cependant, quelques aspects ont été soulignés :
 - *La gestion du tableau de strips* s'est révélée assez lourde : plusieurs points ont contribué à rendre difficile son classement. Le nombre d'avions à gérer est élevé, l'étendue du secteur (regroupement de tous les secteurs du centre de contrôle de Reims) entraîne un temps de transit long, et donc la nécessité de faire évoluer le tableau de strip pour rendre compte de l'évolution de l'avion dans le secteur. Cette activité supplémentaire de reclassement est rarement nécessaire dans les conditions de travail actuelles (moins d'avions à contrôler, secteur plus petit).
 - Les outils de contrôle proposés ont été appréciés. La majorité des contrôleurs ont reconnu l'utilité des couleurs pour distinguer les stades d'évolution des vols. La possibilité de positionner des indicateurs sur les informations à surveiller (simulation des annotations sur les strips papier) a été très utilisée. Les interfaces constituent un espace commun de travail qui sert d'aide à la communication entre les contrôleurs, et d'aide mémoire.
- du point de vue de l'insertion de la grille en sept points sur l'*évaluation de la charge de travail*, les contrôleurs estiment ne pas avoir été gênés. Les contrôleurs organiques trouvent ces évaluations représentatives de la charge du contrôleur radar, mais reconnaissent avoir été influencés par leur propre charge.

Intérêt de l'assistance tactique SAINTEX :

Les contrôleurs estiment l'assistance à la résolution de conflit pertinente. Ils relèvent l'efficacité des résolutions en cap car la séparation est respectée, mais la considèrent comme peu fines (cap de déviation important). Par contre, les résolutions en niveau sont inefficaces car trop pénalisantes pour les vols en terme de consommation. Ils soulignent surtout que ce type d'assistance ne semble réaliste que dans des conditions de contrôle idéales, sans incertitudes. Ils demandent en effet aux outils d'aide qu'ils soient fiables, robustes, prédictibles. Ils ont largement décrit l'outil idéal en précisant ce que l'outil d'assistance devrait être capable de faire, mais aussi en s'inquiétant de ce qui est réellement faisable aujourd'hui. Les avis sont partagés entre certains contrôleurs qui apprécieraient un outil beaucoup plus performant, et d'autres contrôleurs qui préfèrent allouer des tâches simples à l'assistance pour pouvoir se consacrer à des tâches plus intéressantes parce que plus complexes. L'assistance tactique n'a donc pas eu pour conséquence la diminution de la charge de travail du contrôleur radar, mais le report de sa charge vers d'autres tâches.

Les contrôleurs estiment ne pas avoir été gênés par les interventions de SAINTEX. Il est vrai qu'a priori, les conflits partageables sont géographiquement isolés du reste du trafic. Cependant, le paragraphe sur l'analyse des commandes a mis en évidence des changements de stratégie de contrôle avec l'insertion de conflits alloués à SAINTEX. Ces propos doivent donc être pondérés. Une vérification supplémentaire est notamment menée au cours du prochain chapitre.

Le symbolisme adopté sur les vues strip et radar pour signaler les avions pris en charge par SAINTEX a été apprécié par les contrôleurs.

Intérêt de l'assistance stratégique PLAF :

En premier lieu, cette assistance ne présente un intérêt que si l'intégration du pilotage de la répartition au niveau stratégique est acceptée. Cette hypothèse a été validée. Le contrôleur radar reconnaît (après expérience) que le contrôleur organique est plus à même de remplir ce rôle de répartition, et qui plus est, a une confiance totale dans le jugement du contrôleur organique.

En second lieu, l'intérêt de l'assistance passe par l'appropriation de l'interface PLAF. Celle-ci est apparue trop difficile à lire par rapport au temps qui leur était imparti pour l'utiliser. Cependant, mis à part le mode de représentation, ils apprécient certaines informations présentées telles que la prédiction des conflits, et la prédiction de la tendance d'évolution du trafic.

En revanche, l'interface n'a pas servi de support de décision pour l'allocation des conflits. La démarche adoptée par les contrôleurs a été la suivante. Les conflits étaient alloués à SAINTEX par les contrôleurs organiques après ou sans discussion avec les contrôleurs radars. Les contrôleurs radars avouent ne pas avoir lu les propositions de SAINTEX car ils savaient approximativement ce qu'il allait faire à cause de la formation délivrée avant les expérimentations.

5. Conclusion

Ce chapitre a présenté dans une première partie la plate-forme expérimentale. Elle a souligné l'importance de la définition des outils d'aide. Il s'agit de construire une position de travail similaire à celle d'aujourd'hui, pour que l'opérateur conserve ses habitudes de travail, tout en insérant de nouveaux outils d'assistance, et des moyens permettant d'enregistrer l'activité des opérateurs. Les protocoles expérimentaux ont fait l'objet de la deuxième partie. Un soin particulier a été porté à la définition des scénarios, du plan d'expérience, et des phases de familiarisation. La troisième partie de ce chapitre a fourni des résultats en provenance de données objectives, qui permettent de supposer que les outils d'assistance conduisent les contrôleurs à une meilleure performance par une diminution du nombre d'erreurs. Les résultats obtenus à partir des données subjectives valident l'hypothèse émise quant à l'implication du contrôleur organique dans la définition de la répartition. Les réponses aux questionnaires ont soulevé les avantages et inconvénients de la plate-forme expérimentale et des outils d'assistance proposés. Cependant, ces données ne font que refléter le sentiment des contrôleurs vis-à-vis de nouveaux outils d'assistance. Cuny (79) a notamment fait remarquer que les verbalisations recueillies hors contexte, telles que les réponses aux questionnaires, évoquent des connaissances théoriques (connaissance profonde), contrairement aux connaissances recueillies en contexte qui sont moins structurées, davantage liées aux manipulations en cours de réalisation (connaissance de surface). En effet, les analyses effectuées dans ce chapitre ne permettent en aucune façon de connaître quels ont été les impacts produits par l'insertion des outils d'assistance, sur leur activité, sur la coopération homme-homme, et sur la coopération homme-machine. L'accès à ce type de renseignements peut se faire par la complémentarité de différentes sources de données, notamment les verbalisations. Le chapitre quatre montre en effet que les verbalisations représentent la transcription d'une partie de l'activité cognitive des opérateurs. Il expose donc une méthode permettant de faire émerger cette activité cognitive. Puis par comparaison des activités cognitives développées durant les trois situations expérimentales, il émet des hypothèses quant à l'impact des outils d'assistance sur cette activité.

Chapitre IV

Évaluation subjective de l'activité par les verbalisations

1. Introduction

De nombreuses recherches ont porté sur la méthodologie d'analyse de l'activité humaine ou encore d'évaluation des systèmes homme-machine. Que ce soit pour extraire et modéliser les connaissances expertes, pour la construction d'outils d'assistance et leur évaluation, différentes méthodes objectives et subjectives ont été inventées puis testées. Dans la plupart de ces recherches, l'évaluation se fait sur la base d'indicateurs de performance finale, de productivité. Lorsqu'il peut être appliqué, ce type d'indicateur objectif est précieux pour mettre en évidence des différences entre plusieurs types d'assistances et plusieurs formes et modes de coopération. Cependant ils sont tout à fait insuffisants pour comprendre les mécanismes cognitifs de l'opérateur humain ou les mécanismes de coopération homme-machine qui les expliquent et qui permettent de généraliser les résultats à d'autres situations. Le chapitre trois a montré que les évaluations subjectives des opérateurs peuvent également rester à un niveau trop global. Il s'agit donc ici de déterminer une méthode alliant les données subjectives, qui facilitent l'accès aux mécanismes cognitifs de l'opérateur, et les données objectives qui constituent la base de l'analyse.

L'activité cognitive de l'opérateur humain doit être considérée par l'observateur comme constituée de deux parties : une partie explicite directement observable, le comportement, et une partie implicite uniquement accessible par l'interprétation et déterminante dans la structuration du comportement. Ce chapitre se focalise sur la partie implicite et donc sur les mécanismes cognitifs qui déterminent la construction de l'activité humaine. Les approches qu'il présente ont été fortement guidées par la psychologie du travail.

La première partie de ce chapitre tente de justifier l'utilisation des protocoles verbaux dans l'analyse de l'activité des contrôleurs et des coopérations homme-homme et homme-machine. Elle détaille également les modèles de savoir-faire et de savoir-coopérer utilisés pour analyser les verbalisations. La deuxième partie présente ensuite une application détaillée de la méthode. Enfin la dernière partie apporte les résultats de cette analyse, d'abord à partir de l'analyse globale de l'activité, ensuite, par comparaison des situations avec aides et sans aide, et enfin par comparaison des situations explicite et explicite assistée. La conclusion portera sur la méthodologie, et sur l'apport des outils d'assistance.

2. Contribution méthodologique

2.1. Impact d'une communication

L'analyse des communications a déjà fait l'objet de nombreuses études. Falzon souligne notamment que l'étude des langages techniques peut faciliter la définition de langages d'interaction homme-machine (Falzon, 94). Il remarque en effet que les opérateurs dialoguent pour coopérer, mais aussi coopèrent pour dialoguer. Ainsi, chacun des opérateurs se construit un modèle de l'autre lui permettant de s'assurer du bon déroulement de la communication. Une bonne communication suppose effectivement une intercompréhension, et l'établissement d'un ensemble de règles communes (Trognon, 88). Par exemple, lorsque deux opérateurs émettent un diagnostic sur l'état d'un procédé, leur base de réflexion est leur analyse du procédé. En psychologie, la compréhension de l'état du procédé est appelée représentation du procédé. Une fois la communication établie, et en cas de désaccord, l'un des opérateurs va défendre son analyse, et tenter ainsi de modifier l'analyse construite par l'autre opérateur et réciproquement. Gear et Liendo représentent ces échanges sous forme de régulation de système ((Gear & Liendo, 80) dans (Trognon, 88)). Le procédé régulé est la représentation qu'un homme a d'une situation, le régulateur est la représentation que son interlocuteur a de la même situation. Les commandes et sorties du système sont les verbalisations.

Ceci peut être illustré par l'exemple de la conversation suivante :

- J : (m1) Walter avait des invités la nuit dernière
M : (m2) Oui, ils célébraient l'anniversaire de Mérédith
J : (m3) (...) (regardant l'enfant) Quel âge a-t-elle maintenant ?
M : (m4) il a 18 mois
J : (m5) (...) quel ange (...) quel âge à la femme de Walter ?
M : (m6) Oh désolé, j'ai cru que vous parliez du bébé
J : (m7) c'est rien
M : (m8) je me demandais pourquoi vous disiez "elle". Mérédith a 21 ans.

La conversation à partir de m3 peut être représentée ainsi :

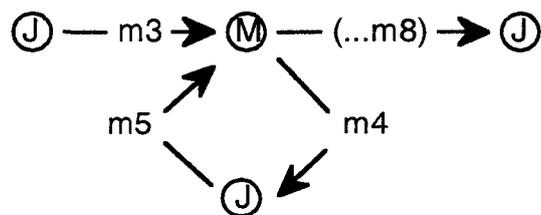
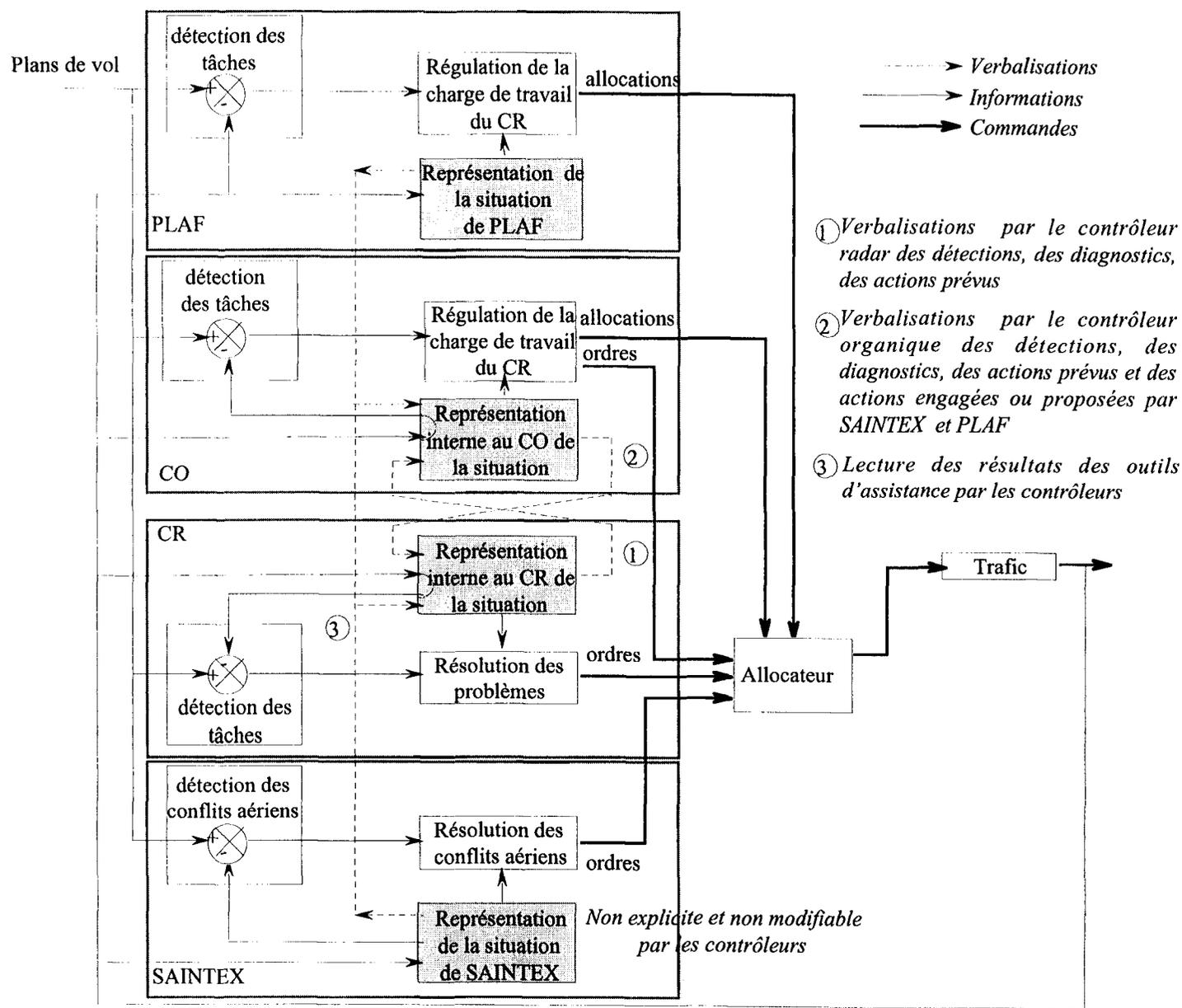


Figure IV-1 : Représentation d'une conversation

Dans cet exemple les échanges verbaux ne tentent pas de construire un diagnostic commun sur un procédé, mais d'avoir le même sujet de conversation, ce qui peut s'en rapprocher.

Il s'agit maintenant d'appliquer ce principe non plus à deux opérateurs humains, mais à un opérateur humain et un agent artificiel. Dans le cadre de l'expérimentation présentée au chapitre trois, le système étudié ne se réduit pas à deux agents, respectivement humain et artificiel, mais à deux agents humains et deux agents artificiels. Dans l'étude de l'interaction entre le contrôleur radar et SAINTEX, le contrôleur organique joue le rôle d'interprète de SAINTEX. Ce dernier dispose des propositions de SAINTEX avant le contrôleur radar, et en raison de ses tâches, a une vue plus globale du trafic, ce qui lui permet de mieux comprendre les propositions de SAINTEX. De même, le contrôleur organique indique à son collègue les propositions d'allocation présentées par PLAF.

Figure IV-2 : Régulation des représentations



La figure IV-2 donne une représentation de l'organisation structurée autour des contrôleurs radar et organique, et des outils d'assistance, SAINTEX et PLAF. Cette représentation met en évidence que les verbalisations du contrôleur organique modifient la représentation du trafic construite par le contrôleur radar. Les informations verbalisées par le contrôleur organique proviennent soit d'informations sur sa propre représentation, soit de son interprétation de la représentation de SAINTEX ou de PLAF construite à partir des détections de situations anormales (conflits, plans de vol non respectés) proposées par ceux-ci.

Ainsi il semble possible à partir des analyses des verbalisations des interactions de construire un observateur des activités de coopération homme-homme et de coopération homme-machine, mais aussi de modéliser (ou au moins de comprendre) les représentations du trafic construites par les contrôleurs organique et radar au cours des trois conditions expérimentales.

2.2. Modèle d'activité cognitive.

Pour que l'analyse des verbalisations soit constructive, elle doit s'appuyer sur un codage systématisé des activités cognitives. A cet effet il est possible d'utiliser des méthodes fondées sur une analyse sémantique ou syntaxique des verbalisations. Cependant les verbalisations des contrôleurs sont caractérisées par des échanges brefs et des phrases souvent non terminées qui ne permettent pas ce type d'analyse. En revanche, le codage des activités cognitives que nous avons utilisé ici, a l'avantage de mettre en évidence les modèles de savoir-faire et de savoir-coopérer des contrôleurs aériens pour vérifier les hypothèses de répartition de tâches.

Le codage des activités cognitives n'a jamais encore pu être systématisé de façon très générale, car il s'appuie nécessairement sur des inférences à partir de protocoles verbaux et non verbaux, contrôlées par un modèle théorique de ces activités. Le modèle doit être à la fois suffisamment général et précis pour réaliser une telle tâche. Le modèle utilisé pour le codage est le modèle de résolution de problème dynamique proposé par Hoc et Amalberti (1995) et présenté au premier chapitre. Il se démarque par sa nature non séquentielle. Il décrit les activités de diagnostic et de prise de décision au moyen des objectifs d'actions de l'opérateur et de la représentation qu'il a de la situation.

2.2.1. Modélisation du savoir-faire des contrôleurs aériens

Trois classes d'activité sont distinguées, les activités d'élaboration de l'information, les activités de diagnostic, et les activités liées à la prise de décision d'intervention (cf. figure IV-3). Chaque classe d'activité est composée de sous-classes, décrites par des prédicats. Les prédicats sont fonctions de l'activité étudiée et des objectifs à atteindre. Un prédicat est défini par plusieurs attributs. De façon générale, les attributs rappellent les variables manipulées, les conditions de déclenchement du prédicat en lien avec la tâche ou la verbalisation précédente, puis le but du prédicat en lien avec la tâche ou la verbalisation suivante.

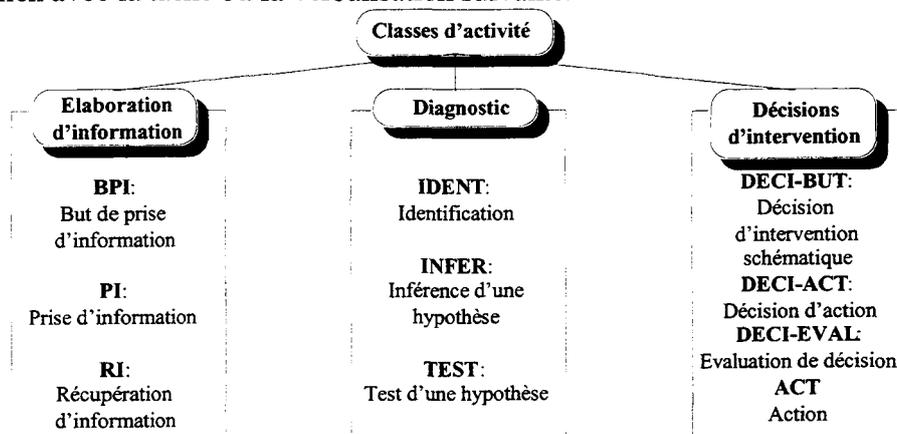


Figure IV-3 : Classes d'activité

2.2.1.1. Élaboration de l'information

La classe d'activité "Élaboration de l'information" est composée de trois prédicats, le But de la Prise d'Information (BPI), la Prise d'Information (PI) et la Récupération d'Information (RI). Le but de prise d'information marque la nécessité pour l'opérateur de disposer d'une information; la récupération d'information correspond au rappel d'une information en mémoire.

Les attributs de ces trois prédicats sont similaires. Ce sont :

<OBJET>:	Type de l'objet sur lequel porte l'information
<VALEUR-O>:	Objet
<VARIABLE>:	Type de variable mesurée sur cet objet
<VALEUR-V>:	Valeur de cette variable
<CONDITION>:	Condition qui a mené à cette interrogation (BPI), cette prise d'information (PI), cette récupération d'information (RI).
<BUT>:	Dans quel but s'interroge-t-on sur cette information ? (BPI), veut-on prendre cette information ? (PI), récupère-t-on cette information ? (RI)

2.2.1.2. Diagnostic

La classe d'activité "Diagnostic" comprend également trois prédicats, l'Identification (IDENT), l'Inférence (INFER) et le Test (TEST). Le principal point qui différencie ces prédicats est l'évolution de l'hypothèse. Elle est certaine dans le cas de l'identification, incertaine pour l'inférence et réévaluée lors du test.

Les attributs sont différents et sont :

IDENT(<OBJET>,<VALEUR-O>,<VARIABLE>,<VALEUR-V>,<CONDITION>,<BUT>)

<OBJET>:	Type de l'objet sur lequel porte l'information
<VALEUR-O>:	Objet
<VARIABLE>:	Type de variable mesurée sur cet objet
<VALEUR-V>:	Valeur qualitative de cette variable
<CONDITION>:	Condition qui a mené à cette identification
<BUT>:	Dans quel but veut-on identifier cette information ?

INFER(<TYPE>,<DE>,<VALEUR-D>,<A>,<VALEUR-A>,<CONDITION>,<BUT>)

<TYPE>:	inductive ou déductive, des conséquences aux causes ou des causes aux conséquences
<DE>:	Information permettant d'inférer
<VALEUR-D>:	Valeur de cette information
<A>:	Information inférée
<VALEUR-A>:	Valeur de cette information
<CONDITION>:	Condition qui a mené à cette inférence
<BUT>:	Dans quel but veut-on faire cette inférence ?

TEST(<HYPO>,<RESULTAT>,<BASE>)

<HYPO>:	Hypothèse
<RESULTAT>:	Confirmation ou infirmation
<BASE>:	Ce sur quoi est testée l'hypothèse

2.2.1.3. Prise de décision

La Prise de décision se décline en quatre prédicats, la Décision schématique (DECI-BUT), la Décision d'intervention (DECI-ACT), l'Évaluation de la décision (DECI-EVAL), et l'action (ACT). Elle est appliquée sur la trajectoire de l'avion (ACT-TRAJ) ou pour le marquage et le classement des strips (ACT-STRIP). La différence caractéristique entre ces prédicats tient à l'évolution de la décision qui devient de plus en plus précise depuis la décision schématique jusqu'à son application, celle-ci pouvant être évaluée à chaque étape. Les attributs des prédicats sont décrits ci-après :

Lorsque la décision n'est pas entièrement précisée :

DECI-BUT(<TYPE>,<MOMENT>,<OBJET>,<VALEUR-O>,<VARIABLE>,<VALEUR-V>,<CONDITION>,<BUT>)

<TYPE>: Type de but
<MOMENT>: Moment de prise de décision de ce but
<OBJET>: Objet
<VALEUR-O>: Valeur de l'objet
<VARIABLE>: Variable de l'objet affectée par le but d'action
<VALEUR-V>: Valeur de cette variable
<CONDITION>: Condition qui a mené à ce but
<BUT>: Dans quel but superordonné (métabut) se fixe-t-on ce but subordonné (sous-but) ?

Lorsque la décision est entièrement précisée :

DECI-ACT(<ACTION>,<MOMENT>,<OBJET>,<VALEUR-O>,<VARIABLE>,<VALEUR-V>,<CONDITION>,<BUT>)

<ACTION>: Action
<MOMENT>: Moment où l'action est mise en oeuvre
<OBJET>: Objet
<VALEUR-O>: Valeur de l'objet
<VARIABLE>: Type de variable de l'objet affectée par l'action
<VALEUR-V>: Valeur de cette variable
<CONDITION>: Condition qui a mené à cette action
<BUT>: Dans quel but veut-on réaliser cette action ?

Lorsque la décision est évaluée :

DECI-EVAL(<ACTION>,<DÉCIDEUR>,<VALEUR>,<BASE>)

<ACTION>: Action évaluée
<DÉCIDEUR>: Acteur de la décision évaluée (CO, CR, SAINTEX)
<VALEUR>: Positive ou négative
<BASE>: Ce sur quoi est fondée l'évaluation

Enfin quand la décision est appliquée :

ACT-STRIP(<INDICATIF>,<TYPE>)

<INDICATIF>: Indicatif de l'avion
<TYPE>: Type d'action

ACT-TRAJ(<INDICATIF>,<TYPE>,<VALEUR>)

<INDICATIF>: Indicatif de l'avion
<TYPE>: Type d'ordre envoyé
<VALEUR>: Valeur de l'ordre envoyé

2.2.2. Modélisation du savoir-coopérer des contrôleurs aériens

Le premier chapitre a souligné l'intérêt des formes coopératives proposées par Schmidt (94). De façon synthétique, les trois formes peuvent s'exprimer en fonction des deux notions définies dans ce même chapitre, le savoir-faire et le savoir-coopérer (cf. chapitre I § 3.2).

La coopération augmentative suppose que les deux agents coopérants disposent de savoir-faire similaires pour réaliser une tâche T décomposable en sous-tâches ST1 et ST2, pouvant être allouées respectivement à l'agent 1 et à l'agent 2. Par exemple, la coopération entre le contrôleur radar et SAINTEX est augmentative puisque les tâches partageables peuvent être allouées soit au contrôleur soit à SAINTEX.

La coopération confrontative suppose également que les agents aient des savoir-faire similaires, mais cette fois la tâche T n'est pas décomposable en sous-tâches. La tâche est donc effectuée en parallèle par les deux agents, mais l'action résultante est allouée à l'un ou l'autre des agents, en fonction du résultat de leur confrontation. Par exemple, la coopération entre le contrôleur radar et SAINTEX est confrontative lorsque le contrôleur désapprouve la prise de décision de SAINTEX.

A l'opposé, *la coopération intégrative* implique que les savoir-faire des agents soient différents (SF1, SF2). Une tâche T est décomposable en sous-tâches complémentaires ST1 et ST2, pouvant être réalisées respectivement par les savoir-faire SF1 et SF2. Par exemple, la coopération entre le contrôleur radar et le contrôleur organique est intégrative lorsque chaque contrôleur assure les tâches propres à son niveau d'activité.

De façon générale, *le savoir-coopérer* des agents consiste à informer l'autre agent de son propre savoir-faire, mais aussi de son savoir-coopérer (au sens de la métacoopération) à l'autre. Le savoir-coopérer permet de communiquer ses intentions sur l'élaboration d'un plan commun, sur l'allocation des tâches, ainsi que sur les résultats consécutifs à l'exécution de la tâche ou des sous-tâches. Le savoir-coopérer se dissocie en deux principaux items, la gestion d'interférences entre les buts de chaque agent et la facilitation des buts de l'autre agent. Le but correspond au recueil d'informations, au diagnostic ou à l'exécution d'une tâche ou sous-tâche appartenant au plan commun répondant à l'objectif global.

Les expérimentations menées dans le cadre du Contrôle de Trafic Aérien intègrent les trois formes coopératives définies par Schmidt. Le tableau IV-1 synthétise les formes de coopération pouvant apparaître en fonction des agents en coopération, de leur rôle, et du type d'interaction (direct ou médiatisé). La diagonale de ce tableau permet de différencier le niveau décisionnel de l'agent. Lorsque les opérateurs humains prennent la décision finale alors, le mode est explicite (cf. Chapitre 1). Lorsque les outils d'assistance décident les résolutions et affectations, le mode est implicite. Enfin, lorsque l'ensemble des agents sont au même niveau décisionnel, nous considérons que le mode est du type explicite assisté, même si c'est l'opérateur humain qui décide finalement de ne pas modifier la proposition de l'outil d'assistance. Nous retrouvons donc les trois modes expérimentés dans SPECTRA V2. Il est possible de remarquer que suivant le mode (explicite, implicite, explicite assisté) la forme de coopération change (forme de coopération soulignée).

Tableau IV-1 : Les formes coopératives de Schmidt et SPECTRA V2

		Mode explicite				Mode implicite				
		Contrôleur radar		Contrôleur organique		SAINTEX (SF tactique)		PLAF (SF stratégique)		
		SF tactique	SF stratégique	SF stratégique	SF tactique	Direct	Médiatisé (par le CO)	Direct	Médiatisé (par le CO)	
Mode explicite assistée	Contrôleur radar	SF tactique		<i>Intégratif</i>	<i>Augmentatif</i>	<u><i>Augmentatif</i></u>	<i>Augmentatif</i>	<i>Intégratif</i>	<i>Intégratif</i>	
		SF stratégique				<i>Intégratif</i>	<i>Intégratif</i>	<u><i>Augmentatif</i></u>	<i>Augmentatif</i>	
	Contrôleur organique	SF stratégique	<i>Intégratif</i>	<i>Confrontatif</i>			<i>Intégratif</i>		<u><i>Augmentatif</i></u>	
		SF tactique	<i>Augmentatif</i>				<u><i>Augmentatif</i></u>		<i>Intégratif</i>	
	SAINTEX (SF tactique)	Direct	<u><i>Confrontatif</i></u>	<i>Intégratif</i>	<i>Intégratif</i>	<u><i>Confrontatif</i></u>			<i>Intégratif</i>	
		Médiatisé (par le CO)	<i>Augmentatif</i>	<i>Intégratif</i>						
	PLAF (SF stratégique)	Direct	<i>Intégratif</i>	<u><i>Confrontatif</i></u>	<u><i>Confrontatif</i></u>	<i>Intégratif</i>	<i>Intégratif</i>			
		Médiatisé (par le CO)	<i>Intégratif</i>	<i>Augmentatif</i>						

 non traité
  considéré impossible

Les contrôleurs radar et organique ont la même formation (cf. Chapitre II § 2.2). Leurs savoir-faire sont alors identiques. Au cours d'une séance de travail, le contrôleur radar réalise des tâches tactiques correspondant à un savoir-faire tactique, et le contrôleur organique réalise des tâches stratégiques correspondant à un savoir-faire stratégique. Cependant, en fonction du type de tâche à réaliser, ou de la surcharge ou sous-charge de travail de l'un des contrôleurs, ils peuvent être amenés à donner leur opinion ou à réaliser une tâche normalement dédiée à l'autre. C'est pour cette raison que le tableau IV-1 propose la distinction entre savoir-faire tactique et savoir-faire stratégique pour chaque contrôleur. En revanche, ce problème ne se pose pas pour les outils d'assistance qui eux sont spécifiques à un niveau (stratégique pour PLAF, tactique pour SAINTEX). Cependant nous avons effectué une distinction quand au type d'interaction entre les contrôleurs et les outils d'assistance. Le contrôleur organique, de par son rôle et sa charge de travail quelquefois inférieure à celle du contrôleur radar, a souvent un rôle de médiateur entre le contrôleur radar et les outils d'assistance.

Cette synthèse nous rend compte de la variabilité de l'interaction entre les agents. En fait, en fonction des situations, la coopération est amenée à prendre différentes formes, quelquefois à combiner les trois. Aussi, plutôt que de définir un modèle pour observer les activités coopératives à partir de chaque forme, nous avons plutôt regroupé les caractéristiques communes à chacune. La figure IV-4 propose une illustration par SADT (89) de ce qui peut être cherché sur une activité coopérative. Une activité coopérative se caractérise par la fonction de la coopération, le contrôle de la coopération, les moyens de la coopération et les informations véhiculées par la coopération souvent issues de l'activité individuelle de l'agent (son savoir-faire). Ces éléments sont maintenant détaillés par les paragraphes suivants.

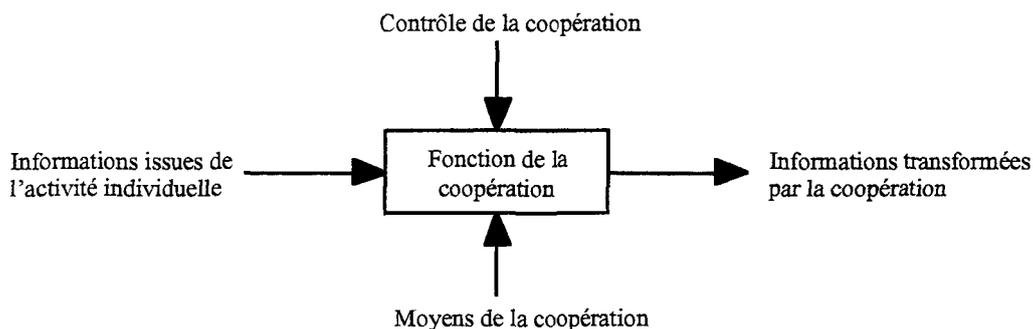


Figure IV-4 : SADT sur la coopération

2.2.2.1. Fonctions de la coopération

Les fonctions de la coopération se classent dans deux catégories, la gestion d'interférences entre les buts des agents et la facilitation des buts de l'autre.

Gestion d'interférences :

- la *détection d'une interférence* entre les buts des deux contrôleurs ou entre les buts d'un contrôleur et d'un outil d'assistance,
- la *gestion de l'interférence* détectée.
- la *construction d'un référentiel commun*. Lorsqu'elle porte sur la représentation, il s'agit d'une mise en accord sur la représentation de la situation. Lorsqu'elle porte sur l'évaluation, il s'agit d'une mise en accord sur l'évaluation de la situation.
- la *surveillance* de l'activité de l'autre contrôleur ou d'un outil d'assistance (contrôle mutuel),

Facilitation :

- *l'identification* d'un but d'un contrôleur ou d'un outil d'assistance par un contrôleur,
- *la facilitation* par l'apport d'une aide de la part d'un contrôleur ou d'un outil d'assistance dans la réalisation du but d'un contrôleur,
- *la métacoopération* : il s'agit alors de la définition d'un code utilisé entre les agents. Dans le cas présent, le code sert principalement à préciser le mode d'utilisation du marquage sur les interfaces. Les contrôleurs pouvaient en effet positionner des symboles de couleurs pour souligner certaines informations. Ces activités de marquage sont enregistrées automatiquement.
- *le partage de tâches* (*l'identification* de l'acteur d'un but, *l'attribution* d'un but à un acteur).

2.2.2.2. Le contrôle de la coopération

Le contrôle de la coopération se réalise au travers de messages :

- *d'accord* ou de *désaccord* qui consistent en une revérification du message par un contrôleur,
- *d'apport* ou de *demande*,
- de *confirmation* ou de *infirmité* qui constituent en fait des accusés de réception,
- *d'évaluation*, de *marquage*, de *précision*, de *surprise*, de *traduction* (traduction dans ses propres termes ce qui vient d'être dit).

2.2.2.3. Les moyens de la coopération

Les moyens de coopération sont les moyens de communication entre les agents. Pour les agents humains, il s'agit de la verbalisation et du marquage d'informations sur les interfaces. Les outils d'assistance ne communiquent qu'à l'aide du marquage d'informations.

2.2.2.4. Les activités sous-jacentes

Les activités sous-jacentes proviennent principalement de l'activité individuelle des agents. Nous retrouvons dans ces activités les prédicats du savoir-faire présentés dans les paragraphes précédents. Nous distinguons en plus le partage de tâche qui est une activité propre à la coopération.

Les principales activités sous-jacentes sont :

- *les inférences*, elles portent sur un groupe d'avions,
- *l'élaboration d'information*, elle porte sur un avion pris individuellement, sur un groupe d'avions, souvent conflictuels, ou sur d'autres informations présentées sur les interfaces,
- *les décisions d'action*, elles portent sur un avion pris individuellement, ou sur un groupe d'avions,
- *les décisions d'évaluation*, elles portent sur une action prise par un contrôleur ou par un outil d'assistance (SAINTEX, PLAF),
- *les affectations*, elles portent sur une affectation proposée au contrôleur radar ou à SAINTEX par un contrôleur ou PLAF.

Les prédicats étant maintenant définis, la partie suivante de ce chapitre applique le principe du codage des verbalisations. Elle présente le logiciel qui permet la manipulation de ces données, et décrit la méthode de codage en illustrant par des exemples.

3. Application de la méthode

3.1. Principes du codage

Pour le codage et certaines analyses des protocoles, nous avons utilisé le logiciel MacSHAPA qui apporte des fonctions d'édition (notamment dirigées par la syntaxe), de recherche et de calcul statistique (Sanderson *et al.*, 1994). Ce logiciel fournit un excellent soutien à la mise en œuvre de notre type de méthodologie, sans imposer de modèle, et à l'élaboration du système de codage. Il a été développé pour soutenir des démarches d'analyse exploratoire de données séquentielles, verbales autant que non verbales.

Un extrait de protocole est présenté sur la figure IV-5. Il est formé de six colonnes synchronisées par des heures de début et de fin d'unité. Les unités sont découpées en fonction des contenus exprimés. La troisième et la sixième colonne correspondent à des protocoles recueillis pendant la passation de l'expérience : les verbalisations simultanées des deux contrôleurs (à l'état brut) et les actions réalisées par les contrôleurs ou le système, accompagnées des événements principaux survenus sur le trafic (codés automatiquement selon le format prédicat/attribut). Les deux premières colonnes séparent les verbalisations recueillies en autoconfrontation sur chacun des contrôleurs (elles sont synchronisées sur les autres à partir des références aux événements de la passation). Enfin, la quatrième et la cinquième colonne présentent le codage manuel, sous le format prédicat/attribut, des activités de chacun des contrôleurs.

Le système de codage utilisé est commun aux trois dernières colonnes. Les deux premières (autoconfrontations) ne sont pas codées en tant que telles; elles ne servent qu'à contrôler les inférences réalisées en ce qui concerne les activités des deux contrôleurs (CR : contrôleur radar; CO : contrôleur organique). Ces activités sont codées dans deux colonnes séparées en regard des verbalisations simultanées. Le codage se fonde sur ces verbalisations recueillies pendant la passation, sur les enregistrements de ce qui a été fait, et des événements enregistrés sur le trafic (dernière colonne), sur le contexte, sur ce qui a été dit en autoconfrontation et sur le modèle de savoir-faire. La reproductibilité du codage est assurée par la convergence obtenue par deux codeurs.

Vis-à-vis des inférences réalisées, nous avons adopté une voie intermédiaire entre deux attitudes extrêmes : (a) la restriction de l'inférence à son premier pas, directement établi sur les données comportementales (verbales ou non) et (b) le prolongement de l'inférence, aussi loin que possible, en s'appuyant sur une notion d'inférence quasi certaine. Les connaissances qu'a le codeur sur le domaine déterminent considérablement cette notion de quasi certitude de l'inférence. Pour autant que ce critère de certitude soit satisfait, nous avons choisi de ne prolonger l'inférence que jusqu'au point où les liens entre les unités codées étaient montrés. Par exemple, lorsqu'un contrôleur exprimait une hypothèse sur un conflit entre avions, nous codons aussi la prise d'information correspondante, même si celle-ci n'était pas exprimée, quand la base d'élaboration de cette hypothèse était évidente. Cette méthode nous a permis de modéliser l'activité implicite verbalisée. Il est clair que cet "observateur" est inefficace si les opérateurs ne verbalisent pas leur activité. Néanmoins nous avons pu constater que les parties cruciales de leur activité donnaient lieu à une verbalisation. Ainsi, sans prétendre être exhaustifs, il est possible de considérer que l'essentiel de l'activité des contrôleurs est couverte par la méthode et l'observateur de verbalisation.

Figure IV-5 : Fenêtre MacSHAPA utilisée

AUTOCONF-CO	AUTOCONF-CR	VERB-SIM	ACTIVITE-CR	ACTIVITE-CO	SYS-CO-CR
1 21:25:00:00 21:25:10:00 OB: 23.45, on repart (...). C'est toi qui désignais là?		1 21:25:00:26 21:25:01:30 CR: Bah je vais tourner le Transavia à gauche alors hein.	1 21:25:00:26 21:25:01:30 DECI-ACT(tourner, immediat, avion, TRA413, cap, G, infer, cr521, resolution, sec601) 2 21:25:00:26 21:25:01:30 CHH(but, facilitation, apport, tourner, TRA413, cr526)		1 21:25:01:00 00:00:00:00 AFFECTATION(AFR674, SPE, OH) 2 21:25:01:00 00:00:00:00 AFFECTATION(EXC461, SPE, OH) 3 21:25:01:00 00:00:00:00 AFFECTATION(LTU814, SPE, OH) 4 21:25:01:00 00:00:00:00 AFFECTATION(TAP345, SPE, OH) 5 21:25:03:00 00:00:00:00 ACT_TRAJ(TRA413, CAP, G37)
	1 21:25:03:00 21:25:05:00 OB: Et Cra, tu l'es dévié.	2 21:25:03:22 21:25:04:44 CO: Avec le CSA? Ça, tu bloques le CSA hein.		1 21:25:03:22 21:25:04:44 DECI-EVAL(tourner, cr527, cr, negative, conflit-CSA123-TRA413, co240) 2 21:25:03:22 21:25:04:44 CHH(but, facilitation, desaccord, tourner, TRA413, co244)	
	2 21:25:05:00 21:25:10:00 CR: Ouais. Un cap assez fort d'ailleurs. 37 degrés. J'ai tapé dur là! Et ??? en direct. Ah oui, c'est ça... c'est ce qu'on n'aurait dû pas faire. C'est la désignation, oui.	3 21:25:05:46 21:25:08:32 CR: Non, non, je vais mettre le Transavia à gauche et le CSA direct Norvenich.	3 21:25:05:46 21:25:08:32 CHH(but, facilitation, desaccord, tourner, TRA413, co245) 4 21:25:05:46 21:25:08:32 DECI-ACT(tourner, immediat, avion, CSA123, directe, NOR, infer, cr521, <BUT>, cr532)		
2 21:25:10:00 21:25:20:00 CO: Oui. Je les ai tous désigné là. Tous y passaient. (gong). Pas tous, mais presque. J'ai dû faire un bon reclassement de... (gong). Un coup celui-là. (gong).	3 21:25:10:00 21:25:15:00 OB: On l'a fait non sur la fenêtre.	4 21:25:10:16 21:25:12:12 CO: T'es gonflé là.		3 21:25:10:16 21:25:12:12 CHH(but, facilitation, desaccord, tourner, CSA123 & TRA413, co245)	
	4 21:25:15:00 21:25:20:00 CR: Ouais. Et puis tu m'as dit, bah tu peux recommencer. Et puis j'ai dit, bah, de toutes façons il y va. Il y va de lui-même. C'est sa route. (gong).	5 21:25:15:18 21:25:16:44 CR: Ouais, c'est pareil. Oui. (gong).	5 21:25:15:18 21:25:16:44 CHH(but, facilitation, accord, tourner, CSA123 & TRA413, co246)		6 21:25:16:00 00:00:00:00 APPEL(SWR1241) 7 21:25:17:00 00:00:00:00 AFFECTATION(AFR674, SPE, OH) 8 21:25:17:00 00:00:00:00 AFFECTATION(EXC461, SPE, OH)

3.2. Mise en œuvre du codage

Le modèle de l'observateur des activités des contrôleurs, tant des trois classes d'activités propres à leur savoir-faire que de la classe relative au savoir-coopérer, ayant été défini, nous allons illustrer ici les prédicats et les attributs de chacune des classes par des exemples issus des expérimentations réalisées. Ce travail permet notamment à différents codeurs de réaliser sensiblement un codage similaire de l'activité.

3.2.1. Codage de l'élaboration de l'information

Trois prédicats permettent de distinguer quatre types d'activités d'élaboration d'information :

- But de prise d'information (BPI) : en verbalisant un but de prise d'information, le contrôleur exprime la nécessité de disposer d'une information.

CR: <u>Qu'est-ce qu'il a prévu pour le Brymon?</u> CFL 2.50 pour le LTU.	BPI (avions,BRY657_LTU814,act_prop, —,surveillance_STX,pi)
---	--

But de prise d'information sur le BRY657 pour connaître la proposition de SAINTEX.

- Prise d'information (PI) : c'est la réalisation de la prise d'information qui est codée.

CR: <u>Qu'est-ce qu'il a prévu pour le Brymon?</u> CFL 2.50 pour le LTU.	PI (avion,LTU814,cfl-STX,250,bpi,—)
---	--

Prise d'information sur la proposition de SAINTEX, SAINTEX a prévu un CFL 250 pour le LTU814 pour résoudre le conflit BRY657-LTU814.

- Récupération d'information (RI) : les récupérations d'informations en mémoire traduisent des mises en relation d'informations qui n'ont pas pu être prises de façon contemporaine et qui sont utilisées ensemble à un moment donné.

CR: <u>4.69. c'est le 3.30. D'accord.</u>	RI (avion,PAA469,cfl-tfl-rfl,330,appel,assume)
---	---

Le contrôleur remémorise le fait qu'il y avait un avion au niveau 330. C'est une information qu'il a eue quelques minutes plus tôt.

3.2.2. Codage du diagnostic

Ces activités sont à la base de la construction d'hypothèse sur l'état d'un vol ou d'un groupe de vols, notamment la détection de conflits aériens.

- Identification (IDENT) : l'identification représente le passage d'une donnée telle qu'elle est lue de façon brute, en une donnée interprétée et catégorisée avec certitude par le contrôleur, en fonction du contexte dans lequel elle se situe.

CR: <u>... On va lui donner du cap alors hein. Oui c'est-à-dire que le Transavia, il est derrière, il est plus rapide hein.</u>	IDENT (avion,TRA413,vitesse,pgq_MAH558, deci-but,justification)
---	---

Le contrôleur identifie le TRA413 comme étant plus rapide que l'avion avec lequel il est en conflit.

- Inférence d'une hypothèse (INFER) : les attributs spécifiques codent l'information sur laquelle se fonde l'inférence et l'hypothèse.

CR: <u>À 2.8, ça ne va pas aller aussi avec le... Non? L'Excalibur et puis l'Air France 6.95? Non, il est devant, l'Air France.</u>	INFER(ded,trajectoires,AFR695_EXC461, conflit,—,pi,—)
---	---

Déduction d'un conflit entre le EXC461 et le AFR495. L'inférence permet de construire une représentation d'une situation future.

- Test d'une hypothèse (TEST) : dans la mesure où les hypothèses sont des anticipations temporelles, le test implique que d'autres informations contemporaines à celles qui ont permis d'inférer l'hypothèse soient utilisées pour modifier son degré de vraisemblance; quand les informations prises ne sont pas contemporaines à celles qui étaient présentes au moment de l'inférence, il s'agit d'une nouvelle inférence, codée comme telle; les attributs spécifiques codent l'hypothèse testée, le résultat du test et la base sur laquelle ce test s'appuie.

CR: <u>À 2.8, ça ne va pas aller aussi avec le... Non? L'Excalibur et puis l'Air France 6.95? Non, il est devant, l'Air France</u>	TEST(conflit_AFR695_EXC461,infirmination, pi)
--	---

Une information a permis au contrôleur de vérifier que les deux avions, AFR695 et EXC461 ne sont pas en conflit

3.2.3. Codage de la prise de décision

Quatre types d'activités sont codés (les trois premières manuellement avec MacSHAPA, la dernière automatiquement par le logiciel SPECTRA V2) :

- Décision schématique d'intervention (DECI-BUT) : il s'agit de décisions schématiques qui ne seront particularisées qu'au moment de la décision effective d'intervention; elles dénotent le caractère schématique de la planification de la prise de décision d'intervention; les attributs spécifiques sont le type d'intervention et le moment considéré pour la mise en œuvre (immédiat ou différé), qui indique le caractère anticipatif de la planification.

CR: <u>Euh... Bah y m'appelle, tiens. Je vais tourner le... Sobelair à droite, ouais. Y va à Bruxelles... Quoique c'est... Ouais, si. Ils ont la même vitesse, même distance. 25 degrés.</u>	DECI_BUT(tourner,immédiat,avion, SLR2744,cap,D,deci-but,—)
--	--

C'est la construction schématique de l'ordre de résolution.

- Décision précise d'intervention (DECI-ACT) : ce prédicat a la même structure que le précédent, sinon que l'intervention est alors entièrement spécifiée; toutefois, la mise en œuvre peut être immédiate ou différée.

CR: <u>Euh... Bah y m'appelle, tiens. Je vais tourner le... Sobelair à droite, ouais. Y va à Bruxelles... Quoique c'est... Ouais, si. Ils ont la même vitesse, même distance. 25 degrés.</u>	DECI_ACT(tourner,immédiat,avion, SLR2744,cap,D25,precondition,—)
--	--

Le contrôleur modifie le cap du vol SLR2744 de 25 degrés à droite.

- Évaluation de décision (DECI-EVAL) : il s'agit souvent de l'évaluation des résultats de l'action, mais aussi d'évaluations anticipées au vu de nouvelles données.

CR: Futura, il l'a remis sur... sur Héricourt, il l'a remis un peu tôt là hein.	PI(avion,FUA629,tourner_STX,directe,act_traj,deci-eval) DECI_EVAL(tourner,STX,negatif,tôt)
---	---

Évaluation négative de l'action mise en œuvre par SAINTEX.

- Action (ACT-*) qui se décline en deux types d'activité :
 - L'action d'un contrôleur sur un strip.

ACT-STRIP(AAL12,ACCEPTE) : Classement du strip de l'AAL12 par le contrôleur organique

Les types d'actions sur les strips sont les suivants :

- PROPOSE : arrivée du strip sur le tableau du contrôleur organique,
 - TRANS_CR : transfert du strip au contrôleur radar
 - ACCEPTE : le contrôleur organique positionne le strip sur son tableau
 - ASSUME : réponse du contrôleur radar à l'appel pilote
 - REPRISE_CO : reprise d'un strip jeté par le contrôleur organique
 - REPRISE_CR : idem pour le contrôleur radar
 - TRANS_SECT : le contrôleur radar transfère le strip au secteur suivant
- L'action d'un contrôleur ou de SAINTEX sur la trajectoire d'un vol.

ACT_TRAJ(AAL12,CFL,350) : Envoie d'un ordre en niveau sur l'AAL12

Les commandes pouvant être effectuées sont :

- EFL : - valeur du niveau
- TFL : - id.
- CFL : - id.
- DIRECTE: - nom de la balise
- CAP : - A + valeur si cap absolu
- D ou G + valeur si cap droite ou gauche

3.2.4. Codage de la coopération

3.2.4.1. Coopération homme-homme

La communication entre les contrôleurs est codée à l'aide du prédicat coopération homme-homme lorsque le sujet de la coopération est indépendant de l'intégration des outils d'assistance.

Exemple de coopération homme-homme :

Verbalisation	Codage Activité CO	Codage Activité CR
CO: Voilà. Le Transavia, c'est terminé tout ça. T'as vu, le Transavia, il avait 2.9 en sortie.	CHH(but,detection_interference,apport,cfl_TRA413,290,info,avion)	
CR: Le 4.13?		CHH(refcom,representation,demande,avion,TRA413,info,avion)

-> Rappel du contrôleur organique au contrôleur radar du niveau de sortie du vol TRA413.

Verbalisation	Codage Activité CR	Codage Activité CO
CR: Alors voyons (gong) qu'est-ce qui m'a souligné? Les 3.30.?	PI(avions,DLH795_SLR2744, marquage,souligne,bpi,—,chh,—) CHH(but,facilitation, confirmation,avions, soulignes,—,infer,avions)	
CO: Ça se voit, non ?		CHH(meta,communication, demande,avions,souligne,—,infer,avions)

-> Le contrôleur radar regarde ce que le contrôleur organique a souligné comme conflit. Le contrôleur organique lui répond en demandant si le codage de conflit lui convient.

Verbalisation	Codage Activité CR	Codage Activité CO
CR: C'est toi qui l'a fait rentrer à 330, le Kilo Tango ?	PI(avion,BAW45KT,EFL,330, surveillance,—,chh,—) CHH(rôle,identification, demande,BAW45KT, EFL-330,—,act,avions)	
CO: Je te le mets à 350		RI(—,avion,BAW45KT, EFL,330,CHH,—,CHH,—) CHH(but,gestion d'interférences,apport, BAW45KT,EFL-350,—,act, avion) DECI_ACT(monter, immédiat,avion,BAW45KT,E FL,350,CHH,—,act-traj,—)

-> Le contrôleur radar est surpris par le changement de niveau d'entrée du vol BAW45KT, et demande au contrôleur organique si c'est lui qui a fait cette modification. Le contrôleur organique lui répond en proposant de le remettre à son niveau initial

3.2.4.2. Coopération homme-machine

Nous codons la communication coopération homme-machine lorsque l'un des outils d'assistance est pris en considération par l'un ou les deux contrôleurs.

Exemple de coopération homme-machine :

Verbalisation	Codage Activité CR
CR: Air Canada, Bry-Troie, 3.7. Ça va, il est tout seul. Bah t'affectes?	CHM(role,attribution,apport,affectation_STX, conflit_FUA629_LDA6469,affect,STX)

-> Le contrôleur radar décide de l'affectation du conflit FUA629-LDA6469 à SAINTEX. et demande au contrôleur organique de faire l'affectation.

Verbalisation	Codage Activité CR
CR: Il l'a descendu à 2.9.	RI(scc609,avion,AFR99,cfl_STX,150,chm,—,chm,—) CHM(but,facilitation,apport,AFR99,resolution-stx-290,—,act,STX)

-> Le contrôleur vérifie le niveau auquel SAINTEX a descendu le vol AFR99

Un tel codage a été réalisé sur l'ensemble des protocoles verbaux issus des trois situations expérimentales, croisées avec les trois paires de contrôleurs. La quatrième partie de ce chapitre présente maintenant les résultats qui proviennent de l'analyse de ce codage.

4. Résultats

Les résultats présentés dans ce paragraphe proviennent de l'interprétation que nous avons construite à partir des fréquences fournies par le logiciel MacSHAPA. Ces fréquences sont issues du rapport obtenu entre le nombre d'unités concernant le prédicat concerné par le nombre total d'unités composant la passation étudiée (une unité correspond au codage d'une verbalisation par un prédicat, une passation comprend environ 600 unités). Sur le mode explicite, l'activité cognitive s'est partagée en 48% d'élaboration d'information, 17% de diagnostic et 35% de prise de décision (cf. figure IV-6) Les fréquences sont classées dans des arbres hiérarchiques, depuis les prédicats généraux que sont l'élaboration d'information (INFO), le diagnostic (DIAG) les décisions d'action (DECI), et la coopération (CHH pour la coopération homme-homme, CHM pour la coopération homme-machine), en passant par les prédicats associés à ces classes d'activité, jusqu'au classement des principaux attributs utilisés dans ces prédicats. Les fréquences sont indiquées entre parenthèses, selon l'ordre de condition expérimentale suivant : sans aide (SA), explicite (EX) puis explicite assistée (EA). Les résultats sont issus des comparaisons effectuées entre chaque type de condition expérimentale (des augmentations ou des diminutions de sans aide à explicite assistée apparaissent), ou en opposant une condition expérimentale aux deux autres (une opposition entre sans aide et avec aides est fréquemment relevée). Nous avons délibérément inséré tous les résultats quantitatifs afin de justifier notre démarche et nos conclusions, cependant une lecture plus rapide des résultats peut se faire en ne lisant que les paragraphes en italique, c'est-à-dire nos déductions. Le lecteur peut éventuellement faire abstraction du paragraphe 4.1 qui présente des résultats très détaillés et se reporter au paragraphe 4.2 qui récapitule l'ensemble des résultats pour une discussion générale.

4.1. Résultats sur la répartition globale des activités

Les premières distributions sont obtenues en distinguant les activités d'élaboration de l'information (INFO : BPI, PI et RI), les activités de diagnostic (DIAG : IDENT, INFER et TEST) et les activités liées aux prises de décision (DECI : BUT, ACT et EVAL). Par ordre décroissant d'importance dans les verbalisations, ces activités s'ordonnent comme suit : INFO, DECI et DIAG (cf. figure IV-6).

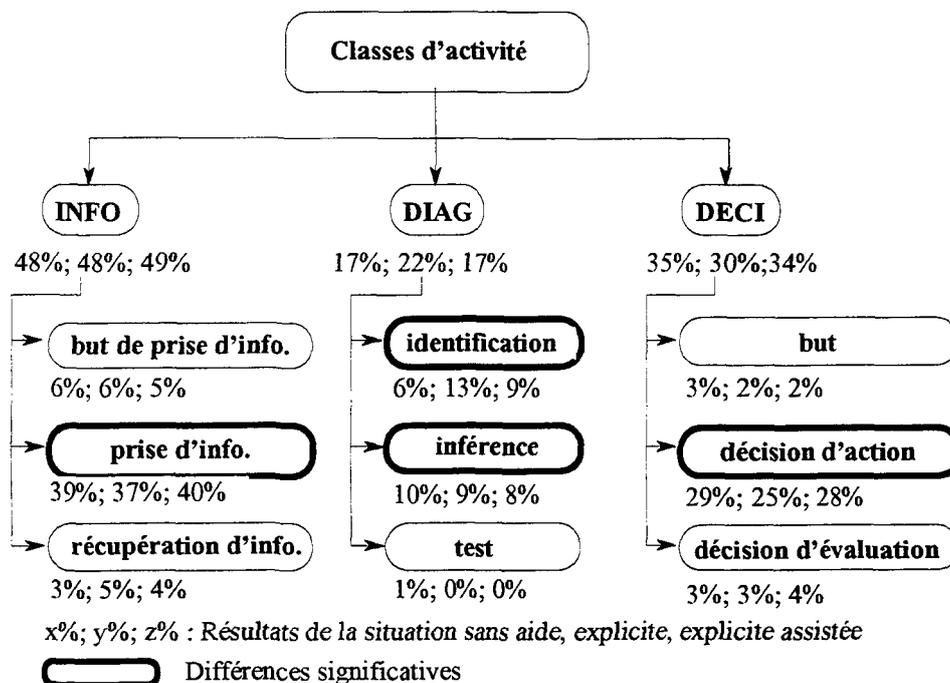


Figure IV-6 : Présentation des résultats suivant les prédicats

Les verbalisations traduisent donc une activité principalement marquée par l'élaboration de l'information et la prise de décision, les diagnostics (essentiellement des détections de conflits) prenant une part plus modeste. Ces derniers sont probablement noyés dans une masse d'activités relativement routinières. À ce niveau d'analyse, la situation EX se distingue des autres, par une plus grande importance des diagnostics au détriment des activités liées aux prises de décision. Les distributions sur les prédicats élémentaires montrent que cette différence tient essentiellement, d'une part aux identifications et d'autre part aux décisions d'actions .

-> *Ce résultat traduit un relief plus prononcé des activités de construction de la représentation de la situation, qui est probablement en lien avec une plus grande nécessité de maîtrise de l'ensemble du trafic en EX.*

4.1.1. *Élaboration de l'information*

4.1.1.1. Objets des prises d'information

Les informations portent principalement sur les avions pris individuellement, et, dans une moindre mesure, sur les groupes d'avions. Les prises d'information sur d'autres objets, comme les niveaux ou les flux, sont négligeables, ce qui témoigne sans doute d'un manque de réalisme des scénarios. De la situation SA à la situation EA, une diminution progressive de l'attention apportée aux avions individuels et une augmentation corrélative de l'attention aux groupes d'avions en conflit réel ou potentiel sont relevées (cf. figure IV-7).

-> *Les aides conduisent donc à des activités qui donnent plus de relief à la détection et au suivi des conflits et, ceci, d'autant plus dans la situation EA.*

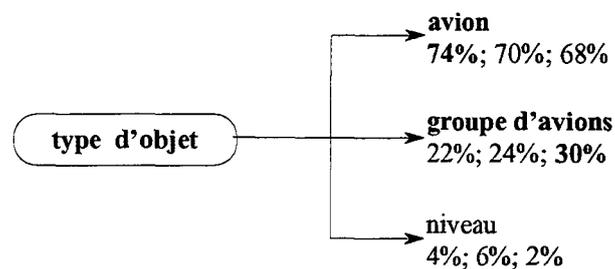


Figure IV-7: Résultats sur les objets des prises d'information

4.1.1.2. Types d'information

En ce qui concerne les avions individuels, pour l'essentiel, les informations prises sont de nature statique (cf. figure IV-8). La différence majeure oppose les situations avec aides entre elles : les informations de référence prennent plus d'importance en EA qu'en EX, alors que les informations dynamiques y prennent moins d'importance.

En revanche, les informations prises sur des groupes d'avions sont essentiellement de nature dynamique. Toutefois, la même opposition entre EA et EX est retrouvée (cf. figure IV-8).

-> *Ce résultat est cohérent avec la plus grande importance des diagnostics en EX, en lien avec la nécessité de maîtrise de l'ensemble du trafic.*

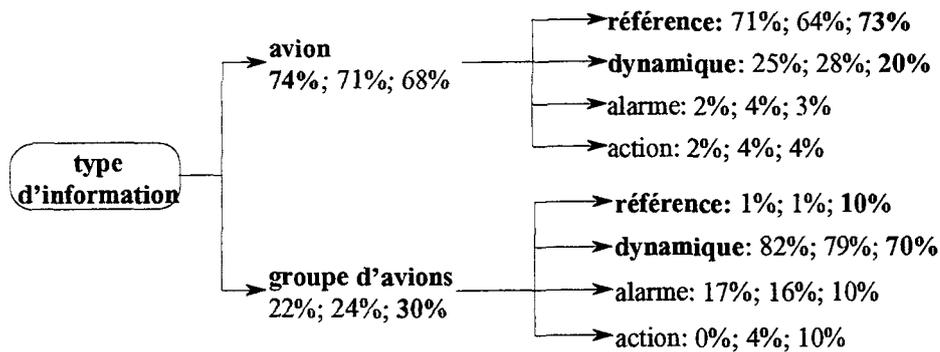


Figure IV-8: Résultats sur les types d'informations recueillies

4.1.1.3. Conditions des prises d'information

Trois résultats essentiels ressortent de l'analyse des conditions des prises d'information (cf. figure IV-9) :

- la réponse à des informations saillantes est plus marquée en situation sans aide que dans les situations avec aides,
- > ce résultat traduit un mode de fonctionnement plus réactif qu'anticipatif
- les activités de surveillance prennent plus d'importance en situation EX que dans les autres situations,
- > ce résultat est compatible avec les résultats précédents, en lien avec la nécessité de maîtrise de l'ensemble du trafic
- les prises d'information liées à la coopération prennent de plus en plus d'importance de la situation SA à la situation EA,
- > ce qui témoigne du rôle croissant de la coopération dans les prises d'information, à mesure que les aides sont renforcées.

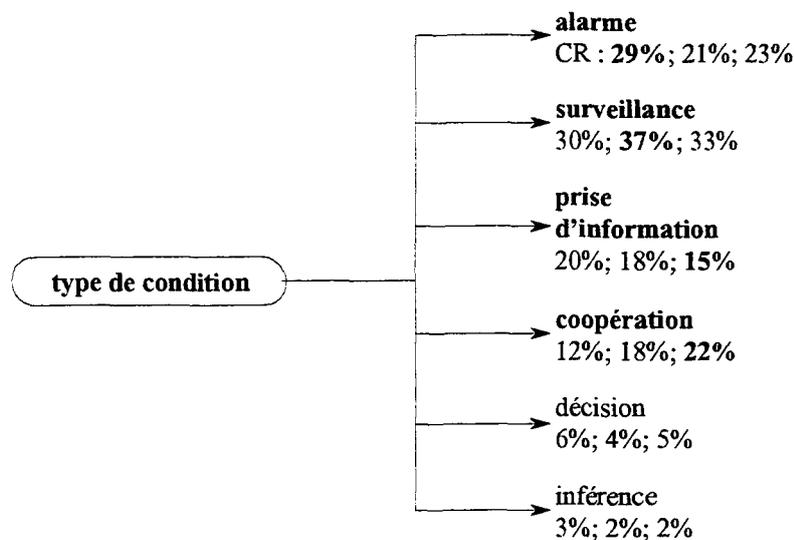


Figure IV-9: Résultats sur les conditions de prise d'information.

4.1.2. Prise de décision

Les verbalisations des prises de décision concernent quasi exclusivement des interventions à mettre en œuvre immédiatement. Ceci ne veut pas dire que les élaborations des décisions ne passent pas, avant, par des étapes plus schématiques, mais en tout cas, elles ne sont pas verbalisées. Il est possible que cette absence de verbalisation témoigne du fait que, dans l'état actuel de la plate-forme, ces décisions schématiques soient inutiles, à la fois pour la coopération homme-homme et homme-machine.

4.1.2.1. Types d'intervention

Une prédominance des interventions sur les trajectoires est soulignée. Ensuite, pour l'essentiel, les interventions se répartissent entre la réponse aux appels des pilotes, le classement des strips et les transferts de strips (cf. figure IV-10).

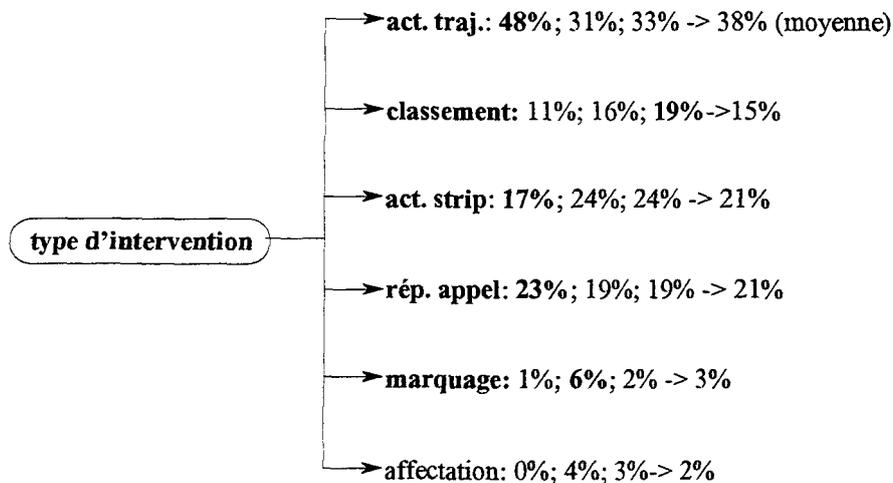


Figure IV-10: Résultats sur les types d'intervention

Par rapport aux situations avec aides, la situation sans aide se caractérise par une prédominance encore plus nette des interventions sur les trajectoires. Sans aide, toutes les résolutions sont à la charge du contrôleur radar, contrairement aux situations avec aides durant lesquelles SAINTEX peut intervenir, mais relativement au nombre d'actions engagées, ce n'est pas cette différence qui peut influencer le résultat.

En remarquant par ailleurs que l'importance prise par les activités de classement des strips (en lien avec les activités de planification) va croissante de la situation SA à la situation EA.

-> *Le fonctionnement plus réactif qu'anticipatif déjà noté en situation sans aide se confirme.*

La situation sans aide donne aussi lieu à un relief un peu plus marqué des réponses aux appels et moins marqué des annotations et transferts de strips.

-> *Ce résultat souligne un manque de planification et au contraire une réponse aux informations saillantes dans la situation sans aide.*

Enfin, le CO développe proportionnellement plus d'activités de marquage de strips en situation EX que dans les autres situations.

-> Ce résultat témoigne probablement d'une plus grande nécessité de coordination entre les deux contrôleurs, le CO apportant des éléments pour la prise de décision du CR (CR et CO pouvant tous les deux agir sur la répartition des tâches).

4.1.2.2. Conditions des prises de décision

Les distributions des deux contrôleurs étant assez différentes, il convient ici de commenter chacune d'entre elles, avant de relever un élément commun sur la distribution globale (cf. figure IV-11).

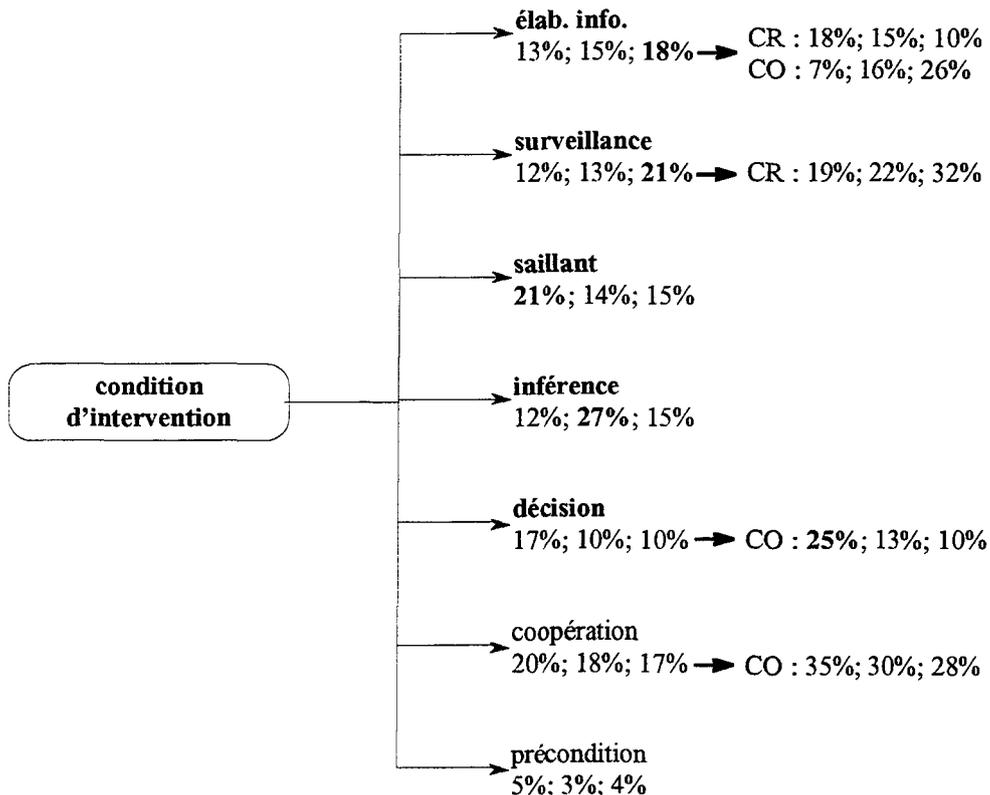


Figure IV-11: Résultats sur les conditions d'intervention

Sur le protocole CR, de la situation sans aide aux situations avec aides, sont notés une réduction des pourcentages de prises de décision à la suite d'activités d'élaboration de l'information, et une augmentation corrélative des pourcentages de prises de décision dans le cadre d'activités de surveillance.

-> Ceci confirme l'activité plus réactive en situation sans aide et plus anticipative en situation avec aides. En effet, sans aide les contrôleurs prennent les informations et les décisions successivement alors qu'avec les outils d'assistance, les contrôleurs, après une préparation et planification de leurs actions, prendraient les décisions en surveillant les préparations.

Sur le protocole du contrôleur organique, la situation sans aide met davantage en relief les décisions prises juste à la suite d'une autre décision et elles sont à la suite d'une action de coopération.

- > *Le premier résultat peut être mis en relation avec une moins grande assurance dans les prises de décision (succession de décisions contraires), le second avec une plus grande nécessité de coopération, du fait de la charge, entre les deux contrôleurs.*

Il convient également de noter qu'en situation EX, les prises de décision du CO nécessitant des activités d'inférence sont proportionnellement plus fréquentes que dans les autres situations.

- > *Ce résultat témoignerait de la nécessité pour le CO de mettre en évidence ses décisions, et donc la construction du référentiel commun en EX, puisque les décisions du CO concernent le CR.*

Enfin, lorsque les deux protocoles sont regroupés, deux phénomènes apparaissent. Les décisions prises sur la base d'informations saillantes sont un peu plus fréquentes dans la situation sans aide que dans les situations avec aides. Celles qui sont prises dans le cadre d'activités de surveillance sont plus fréquentes en situation EA que dans les autres situations.

- > *Ceci confirme une activité plus réactive en situation SA et plus anticipative en situation EA.*

4.1.3. Coopération

La coopération occupe environ 26% de l'activité des contrôleurs. Dans les situations avec aides, la coopération homme-homme prend une place plus importante que la coopération homme-machine (18% de CHH pour 8% de CHM). Dans tous les cas, la participation du CO à la coopération est nettement plus importante que celle du CR. En d'autres termes, le CO aide davantage le CR que l'inverse, ce qui est évidemment déterminé par l'organisation du travail. Enfin, aucune différence n'est relevée quant à l'importance de la coopération homme-machine entre les deux situations avec aides.

Nous examinerons maintenant chacune des activités de coopération selon les attributs suivants :

- *type*: but, méta, référentiel commun et rôle,
- *type de coopération sur les buts* : identification de but, facilitation, détection et gestion d'interférence,
- *contrôle de la coopération* : apport et demande, accord et désaccord, confirmation et infirmation, indécision, précision, suggestion de décision,
- *activité sous-jacente à la coopération*.

4.1.3.1. La coopération homme-homme

Sur l'ensemble des activités de coopération, c'est la coopération sur les buts qui est prédominante. Elle prend de plus en plus d'importance de la situation SA à la situation EA (cf. figure IV-12).

- > *Ce résultat témoigne d'une coopération plus opérationnelle avec les aides.*

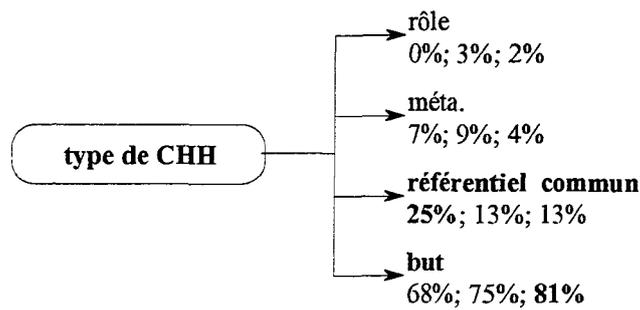


Figure IV-12: Résultats sur les types de coopération homme-homme

L'examen CHH sur les buts (cf. figure IV-13) montre que les activités de facilitation de la tâche d'un contrôleur par l'autre sont prédominantes aux activités de détection/gestion d'inférence et d'identification des buts. Les activités de facilitation prennent plus d'importance dans les situations avec aides que dans la situation sans aide, et inversement les activités de détection/gestion des interférences sont prédominantes sans aide.

-> Ce résultat confirme donc la plus grande difficulté de la CHH sans aide.

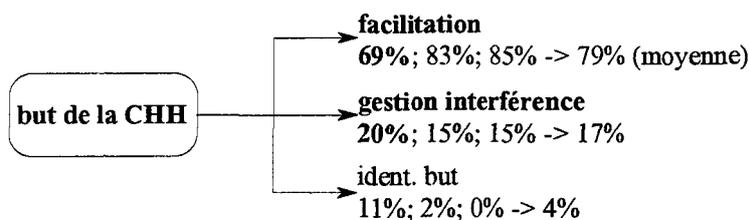


Figure IV-13: Résultats sur les buts de la coopération homme-homme

Pour l'ensemble des contrôleurs, la CHH se manifeste essentiellement par des apports d'information, des demandes d'information et des confirmations (cf. figure IV-14). Mais les situations ne se distinguent pas de la même manière pour chacun des deux types de contrôleurs.

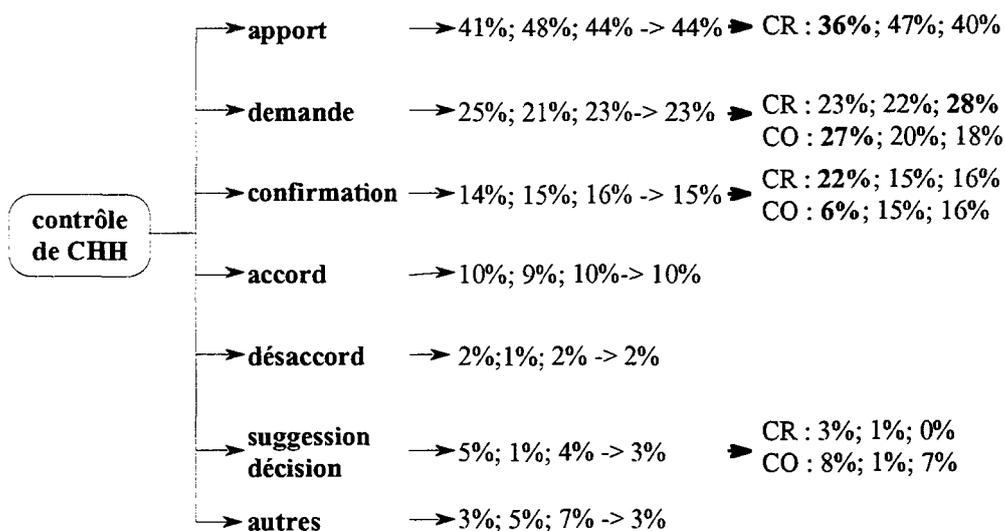


Figure IV-14: Résultats sur les contrôles de la coopération homme-homme

La situation SA renforce les confirmations chez le CR, avec un minimum d'apports, tandis qu'à la fois elle renforce les demandes chez le CO et réduit les confirmations.

- > *Sans aide, le CR présente donc un profil plus marqué de récepteur passif d'informations et ne semble pas en mesure de répondre aux demandes d'informations de la part du CO qui en est davantage demandeur, ce qui confirme encore la difficulté de la CHH sans aide.*

La situation EX renforce les apports chez le CR et réduit les suggestions de décision chez le CO.

- > *Dans cette situation, le CR présente un profil inverse d'émetteur d'informations pour le CO et ce dernier participe moins à la prise de décision.*

La situation EA renforce les demandes chez le CR.

- > *Le partage des tâches plus rigide dans cette situation peut expliquer que le CR ait un rôle plus marqué de demandeur d'informations.*

Les activités sous-jacentes à la CHH se répartissent, pour l'essentiel, entre l'élaboration de l'information, la détection de conflits et les décisions d'action (cf. figure IV-15). Une importance croissante des communications liées à l'élaboration de l'information de la situation SA à la situation EA peut être notée. En situation EA, les communications à propos de la détection des conflits sont les moins fréquentes. Enfin, c'est en situation EX que les communications à propos des décisions d'action et des évaluations de décisions sont les moins fréquentes. Les communications centrées sur la communication elle-même y sont aussi les plus fréquentes. Les situations SA et EA présentent donc des profils assez proches, sinon que la CHH sur la détection de conflits prend moins d'importance en EA (ce qui est compatible avec des prises d'information sur les conflits moins fréquentes dans cette situation).

- > *La situation EX se distingue très nettement des autres situations avec une moins bonne CHH sur les décisions et leur évaluation, et des difficultés de communication. Une moins bonne CHH en EX est encore confirmée. Toutefois, dans cette situation, la CHH sur les décisions, bien qu'elle soit plus mineure, porte davantage sur la résolution de conflits que dans les autres situations.*

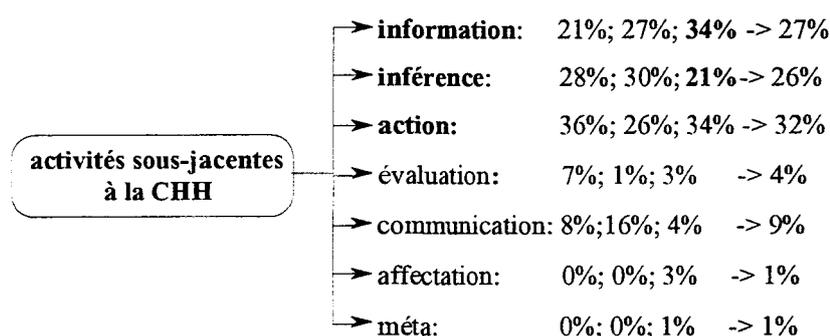


Figure IV-15 : Résultats sur les activités sous-jacentes de la coopération homme-homme

4.1.3.2. La coopération homme-machine

Les comparaisons portant sur la CHM concernent évidemment les situations EX et EA (cf. figure IV-16). Les CHM portent essentiellement sur les buts et l'attribution des rôles. En situation EA, puisque le CR ne peut pas piloter directement le répartiteur, l'attribution des rôles prend un relief plus marqué. En situation EX, les communications à propos du code de communication sont renforcées.

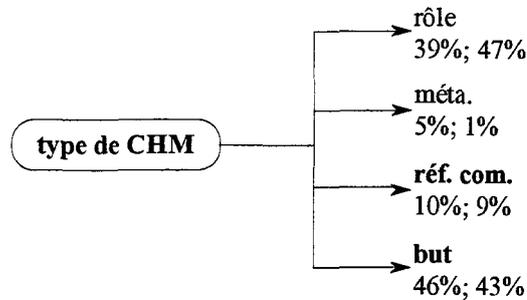


Figure IV-16 : Résultats sur la coopération homme-machine

En ce qui concerne la CHM sur les buts (cf. figure IV-17), les différences entre les situations s'inversent d'un contrôleur à l'autre. Chez le CR, la situation EA accroît les CHM de type facilitation et réduit les CHM liées aux interférences. Le phénomène inverse est relevé chez le CO.

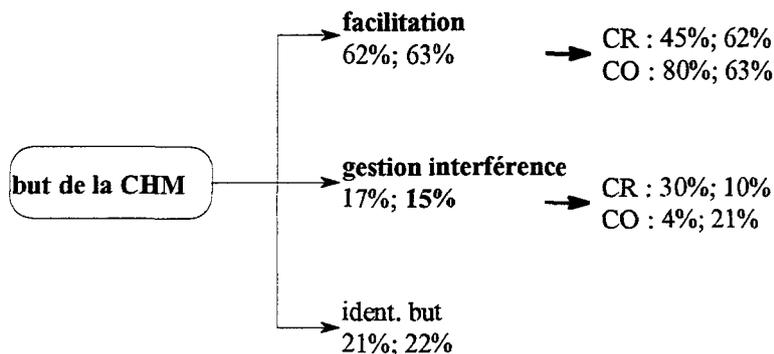


Figure IV-17: Résultats sur les buts de la coopération homme-machine

-> Les attitudes des deux contrôleurs vis-à-vis de SAINTEX semblent donc s'inverser d'une situation à l'autre. La nécessité de décider de l'affectation d'un conflit (CR en EX et CO en EA) induit un accent plus marqué de la CHM sur la détection et la gestion d'interférences. Au contraire, quand l'affectation est décidée par ailleurs (CO en EX et CR en EA), elle est plutôt conçue comme une facilitation (simple contrôle mutuel) (cf. tableau IV-2).

CHM-BUT	Explicite	Explicite assistée
Contrôleur Radar	- facilitation + gestion interf.	+ facilitation - gestion interf.
Contrôleur Organique	+ facilitation - gestion interf.	- facilitation + gestion interf.

Tableau IV-2 Attitudes inversées des contrôleurs sur les buts de la coopération homme-machine

Une inversion des attitudes des deux contrôleurs d'une situation à l'autre sur les contrôles de la CHM est aussi soulignée (cf. tableau IV-3). Chez le CR, en EA, la CHM se traduit moins par des apports et plus par des confirmations. À l'inverse, chez le CO, elle se traduit plus par des apports et moins par des confirmations (cf. figure IV-18).

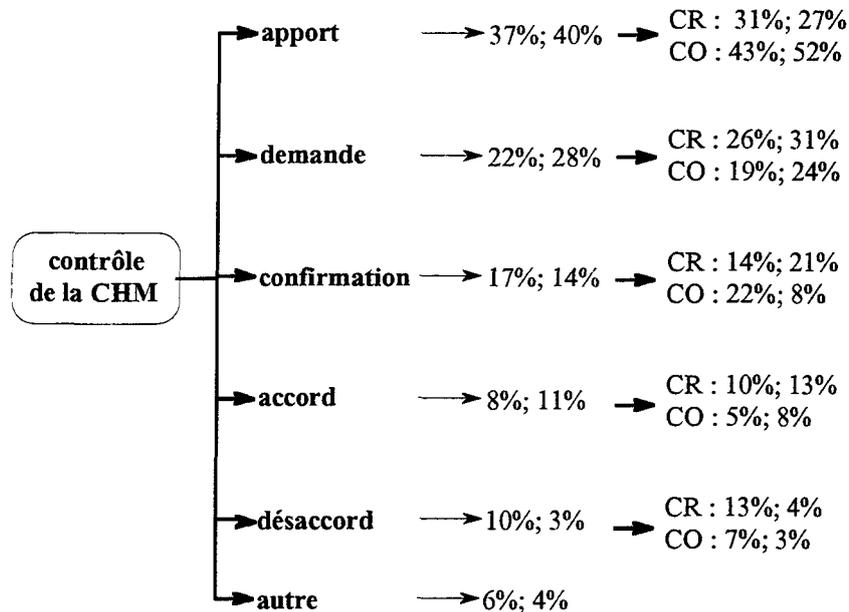


Figure IV-18: Résultats sur les contrôles de la coopération homme-machine

-> Quand l'implication dans la décision d'affectation est forte, le contrôleur (CR en EX et CO en EA) est davantage en situation d'émetteur. Quand elle est faible (CO en EX et CR en EA), il est plutôt en situation de récepteur (cf. tableau IV-3).

CHM CONTRÔLE	Explicite	Explicite assistée
Contrôleur Radar	+ apport + désaccord	+ accord + demande + confirmation
Contrôleur Organique	+ désaccord + confirmation	+ accord + apport + demande

Tableau IV-3: Attitudes inversées des contrôleurs sur les contrôles de la coopération homme-machine

Par ailleurs, quel que soit le contrôleur, la situation EA renforce les demandes et les accords, tandis qu'elle réduit les désaccords.

-> Il est ainsi constaté que, l'augmentation des fréquences, sur les demandes d'information sur les outils d'assistance dans la situation EA, conduit à une approbation de la part des contrôleurs, ce qui n'est pas le cas de la situation EX.

Ces critiques du comportement des aides sont proportionnellement moins marquées chez le CO que chez le CR qui reste le premier intéressé. Par ailleurs, le CO exprime proportionnellement moins de demandes que le CR.

Les activités sous-jacentes à la CHM (cf. figure IV-19) concernent de façon prépondérante l'affectation des conflits, avec un relief plus marqué en situation EA. Corrélativement moins d'inférences et de décisions d'action sont sous-jacentes à la coopération homme-machine.

-> Ainsi, l'EA semble favoriser la coopération homme-machine, en provoquant moins de négociations sur la définition des tâches affectées, mais plus sur la décision d'affectation en elle-même.

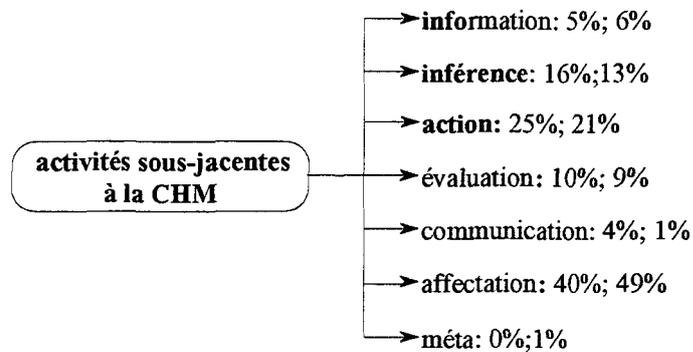


Figure IV-19: Résultats sur les activités sous-jacentes à la coopération homme-machine

4.1.4. Effet de la charge de travail

Le chapitre III (§ 4.2.1) a montré que les scénarios comportent quatre niveaux de charge, deux sont relatifs aux phases ascendantes et descendantes dues au commencement et à la fin des scénarios. Les deux autres niveaux de charge sont intéressants puisqu'ils présentent une charge moyenne (phase 2 du scénario) suivie d'une charge forte (phase 3 du scénario). En examinant les distributions sur les prédicats (à l'exception des activités de coopération) et les groupes prédicats entre la phase 2 et la phase 3, le relief plus marqué des diagnostics en EX, déjà constaté sur les protocoles complets, se confirme. Cependant, la réduction des activités liées aux prises de décisions, également relevée sur ces protocoles dans cette même situation, n'apparaît plus que dans le cas d'une charge élevée. La charge ne paraît donc pas modifier l'effet du facteur expérimental principal sur les activités développées, la coopération mise à part. Toutefois, il est possible de noter un effet direct de la charge sur la coopération et une interaction entre l'effet de la charge et de ce facteur principal sur la coopération, même si ces effets restent peu importants. Avec l'accroissement du niveau de charge (de la phase 2 à la phase 3), un léger renforcement de la CHH (de 19% à 22%) et une réduction de la CHM sont constatés (de 12% à 8%). Enfin, l'accroissement de la charge fait passer la CHM d'une légère prédominance en situation EA, par rapport à EX (13% contre 10%), à une quasi équivalence (7% contre 8%).

Le niveau de charge ne présente finalement que des effets limités sur les activités cognitives et la coopération.

4.2. Discussion

La discussion se focalise sur les trames dessinées par les variables d'activité. Une présentation synthétique des résultats, proposée sur le tableau IV-4, constitue un support à cette discussion. La lecture des résultats présentés dans le paragraphe précédent souligne l'existence de deux oppositions, celle entre les situations avec aides et sans aide, et celle entre les situations explicite et explicite assistée.

4.2.1. Situations avec aides et situation sans aide

Les situations avec aides se distinguent de la situation de contrôle sans aide de deux points de vue : celui des activités cognitives individuelles et celui de la coopération homme-homme.

En premier lieu, le mode de fonctionnement des opérateurs est plus anticipatif que réactif dans les situations avec aides (par rapport à la situation sans aide). Leurs activités sont davantage planifiées et moins développées au gré des événements de ces situations. Plusieurs indicateurs viennent à l'appui de cette interprétation, en distinguant nettement les situations avec aides de la situation sans aide :

- Les prises d'information sont moins conditionnées par la saillance des événements (et davantage par la surveillance en EX); elles sont plus nettement déterminées par la détection et le suivi des conflits. En effet, l'attention aux informations sur des groupes d'avions est plus marquée que celle concernant des avions isolés; ce phénomène est peut-être dû à la nature des outils d'assistance qui insiste plutôt sur la gestion des conflits.
- Les décisions d'action mettent davantage en relief les actions de classement des strips et moins en relief les actions sur les trajectoires ou les réponses aux appels. Elles surviennent moins fréquemment à la suite d'informations saillantes et plus fréquemment en lien avec la surveillance (pour le CR et en EA), c'est-à-dire moins déterminées par l'urgence que par un plan d'intervention. Par ailleurs, le CO semble prendre des décisions plus assurées (moins contredites dans des suites de décisions contradictoires).

Ce critère d'évaluation du fonctionnement de l'opérateur (anticipatif par opposition à réactif) a été mis en avant par Hoc & Amalberti (1995) comme étant primordial dans l'évaluation des aides à l'activité. En effet, un mode de fonctionnement anticipatif permet à la fois de préparer les réponses convenables pour qu'elles soient rapidement mises en œuvre au bon moment, et de répondre aux événements de façon cohérente avec un plan d'ensemble de gestion de la situation. Les aides joueraient alors un rôle positif. Il est probable que le déterminant majeur de ce fonctionnement anticipatif soit la réduction de charge de traitement cognitif, apportée par les aides. Il en résulte que les contrôleurs disposent du temps nécessaire pour planifier leur activité et pour éviter de répondre aux événements sans plan cohérent.

	<i>Situation Sans Aide</i>	<i>Situation Explicite</i>	<i>Situation Explicite Assistée</i>
GROUPES DE PRÉDICATS		+ DIAG (IDENT) - DECI (DECI-ACT)	
<i>PI (objet)</i>	+ avion - avions	>>> <<<	- avion + avions
<i>PI (variable) /avion ou avions</i>		- référence + dynamique	+ référence - dynamique
<i>PI (condition)</i>	+ saillance - coopération	+ surveillance <<<	+ coopération
<i>DECI-ACT (action)</i>	+ act. trajectoires - classement strips + réponse appels - transfert strips	<<< + marquage (CO)	+ classement strips
<i>DECI-ACT (condition) CR</i>	+ élaboration information - surveillance	>>> <<<	- élaboration information + surveillance
<i>DECI-ACT (condition) CO</i>	+ décision + coopération	+ inférence	
<i>DECI-ACT (condition) CO+CR</i>	+ saillance		+ surveillance
<i>CHH (type)</i>	- but + référentiel commun	<<<	+ but
<i>CHH (valeur-t) /but</i>	- facilitation + interférences		
<i>CHH (contrôle) CR</i>	+ confirmation - apport	+ apport	+ demande
<i>CHH (contrôle) CO</i>	+ demande - confirmation	- suggestion décision	
<i>CHH (activité)</i>	- élaboration information	<<< - prise décision - évaluation décision + communication + résolution conflit (dans les prises de décision)	+ élaboration information - inférence
<i>CHM (type)</i>		- attribution rôle + méta	+ attribution rôle - méta
<i>CHM (valeur-t) /but CR</i>		- facilitation + interférence	+ facilitation - interférence
<i>CHM (valeur-t) /but CO</i>		+ facilitation - interférence	- facilitation + interférence
<i>CHM (contrôle) CR</i>		+ apport - confirmation	- apport + confirmation
<i>CHM (contrôle) CO</i>		- apport + confirmation	+ apport - confirmation
<i>CHM (contrôle) CO+CR</i>		- demande - accord + désaccord	+ demande + accord - désaccord
<i>CHM (activité)</i>		- affectation	+ affectation

Tableau IV-4 : Principaux résultats sur les activités cognitives par situation expérimentale

Légende du tableau : chacune des lignes du tableau correspond à un prédicat (ou un groupe de prédicats). Mise à part la coopération homme-machine (qui ne concerne que les situations EX et EA), les signes « + » et « - », placés devant les valeurs d'attributs dans une colonne correspondant à une situation, signifient que ces valeurs ont été observées plus ou moins fréquemment que dans les deux autres situations. Toutefois, lorsque les fréquences évoluent de façon continue de la situation SA à la situation EA, des chevrons sont disposés dans la case correspondante de la colonne EX.

En second lieu, les aides paraissent rendre la coopération homme-homme plus aisée :

- Cette forme de coopération est plus opérationnelle en portant plus directement sur les buts et en nécessitant moins d'activités de construction de référentiel commun.
- Quand elle porte sur les buts, elle est plus souvent du type facilitation (réalisation en parallèle d'une même tâche, pour un contrôle mutuel) que du type détection ou gestion d'interférences entre tâches différentes.
- Le CR apparaît moins comme un récepteur passif d'informations que dans la situation sans aide.
- Le CO apparaît moins comme un demandeur d'information que dans la situation sans aide.
- Enfin, les prises d'information se développent plus volontiers dans des épisodes de coopération, il en est de même pour les prises de décisions du CO.

Les interfaces associées aux aides semblent créer un espace commun d'informations partagées qui favorise de ce fait la coopération homme-homme.

4.2.2. Répartition explicite assistée et répartition explicite

Les différences observées entre la situation explicite assistée (EA) et la situation explicite (EX) portent à la fois sur la maîtrise de l'ensemble du trafic, sur la planification, sur la coopération homme-homme et sur la coopération homme-machine.

La situation EA semble présenter moins de difficulté de gestion de l'ensemble du trafic. Les activités de construction de la représentation de la situation apparaissent moins saillantes : les activités liées au diagnostic prennent moins de relief, ainsi que les prises d'informations dynamiques et les prises d'information en lien avec la surveillance. Le CO prend moins fréquemment des décisions fondées sur des inférences. Mais les solutions adoptées pour les conflits sont choisies pour minimiser les risques d'interférence avec les résolutions de SAINTEX. Il est probable que l'implication du système d'aide dans l'affectation des conflits, réduise la charge des contrôleurs en matière de gestion d'ensemble du trafic, ce qui n'est pas le cas lorsque l'affectation relève exclusivement des décisions des contrôleurs. Cette propriété doit toutefois être évaluée avec précaution puisqu'en situation explicite, le système d'aide n'assure pas lui-même la gestion d'ensemble du trafic. Si elle n'est pas non plus assurée par les contrôleurs, la fiabilité du système homme-machine peut se dégrader. En effet, aucun résultat ne permet d'affirmer qu'en situation EA, d'une part cette gestion soit bien conduite, d'autre part qu'elle présente moins de difficulté qu'en situation EX. Cependant, en situation EA, les prises d'informations portent davantage sur les groupes d'avions (en lien avec la détection et la résolution des conflits) et moins sur les avions isolés. Ceci pourrait témoigner de la plus grande focalisation sur les conflits que déterminent les aides en situation EA. Cette focalisation peut être interprétée positivement : la représentation de l'ensemble du trafic peut être plus aisée lorsque des structures de groupes d'avions sont manipulées.

La situation EA, par rapport à la situation EX, renforce encore une fois un mode de fonctionnement plus anticipatif et moins réactif. La planification est marquée par un plus grand relief des actions de classement de strips et des décisions prises dans le cadre d'activités de surveillance. Les résolutions se déroulent en un moins grand nombre d'étapes en EA qu'en EX. Nous avons déjà noté que la présence des aides renforçait les activités de planification, probablement grâce à une réduction de la charge cognitive. Nous constatons ici que, plus les aides sont riches, plus cet effet est marqué.

Toujours en comparaison à la situation EX, la situation EA semble permettre une meilleure coopération homme-homme :

- Elle nécessite moins d'explicitation par le CO de l'état de la situation (activités de marquage).
- La CHH y est plus opérationnelle en portant davantage sur les buts et moins sur la communication elle-même; elle est aussi plus marquée sur les prises de décision et leurs évaluations.
- La participation du CO à la prise de décision y est plus marquée (par des suggestions de décision), de même qu'il apparaît plus demandeur d'informations.
- Les prises d'informations sont davantage liées à des activités de coopération.
- Par contre, il y a moins de coopération sur les activités d'inférence.

Ceci peut être produit par la définition d'un espace commun d'informations partagées encore plus riche. Quant à la coopération du CO dans les prises de décision, il se peut que son implication dans la répartition l'amène à analyser la situation de façon plus approfondie, avec un accent sur des demandes d'information au CR.

Dans la mesure où le CR ne peut pas agir directement sur la répartition, la situation EA conduit à renforcer la CHM sur l'attribution des rôles et sur les affectations. D'une façon générale, les informations sur le comportement des aides sont davantage sollicitées en situation EA, mais elles conduisent à une plus grande fréquence d'accords et, corrélativement, une moins grande fréquence de désaccords. Il semble donc que les informations et les actions produites par les aides soient bien acceptées par les contrôleurs en situation EA.

Les résultats sur les buts et les contrôles de la CHM soulignent une implication différente de chacun des contrôleurs. En situation EA, le CO semble davantage impliqué dans la répartition que le CR, alors qu'en situation EX le CR peut tout aussi bien agir que le CO sur la répartition. L'implication du contrôleur (CR ou CO) dans la répartition le conduit :

- à développer une CHM sur les buts qui met davantage l'accent sur la détection et la gestion d'interférences entre buts, et qui met moins en relief la facilitation (contrôle mutuel),
- à mettre davantage l'accent, dans la CHM, sur l'apport d'informations et moins sur la confirmation d'informations reçues.

5. Conclusion

L'un des premiers points à souligner est l'apport d'une telle méthodologie dans l'analyse d'expérimentation. Elle permet de prendre du recul vis-à-vis du procédé, pour davantage intégrer les facteurs humains. Ce principe est d'autant plus important que dans le cadre du trafic aérien, les critères d'analyse du procédé sont très difficiles à définir et à contrôler. Mais cette méthode évite également de trop s'appuyer sur les évaluations subjectives des opérateurs, quelquefois très générales et conceptuelles, ou trop orientées par des a priori.

L'inconvénient de cette méthodologie est la lourdeur de sa mise en œuvre. Elle implique des moyens d'enregistrements précis, un codage manuel des verbalisations des neuf expérimentations, et un investissement dans l'analyse coûteux en temps. Cependant, la nouvelle version du logiciel d'analyse (MacSHAPA) permettra d'éviter la transcription manuelle des verbalisations puisqu'une animation audio/vidéo fait partie intégrante de la fenêtre de travail.

Les résultats apportés par cette méthode portent sur l'analyse de l'activité cognitive développée par les opérateurs, tant sur la supervision et la résolution de problèmes, que sur les activités coopératives engagées. Ils confirment les conclusions sur la performance du chapitre précédent : le mode de répartition explicite assistée apparaît comme le plus favorable. Cette situation implique une séparation rigide des rôles de trois agents, le contrôleur organique, le contrôleur radar et le système d'aide. Mais il faut alors supposer que la réduction des activités de supervision de l'ensemble du trafic est compensée par une meilleure coopération.

Ces résultats encourageants doivent maintenant être confirmés par des expérimentations plus réalistes. Elles devraient introduire des éléments non déterministes, tels qu'ils peuvent se présenter dans la réalité, pour respecter la nécessité d'une supervision permanente de l'ensemble du trafic. Le réalisme porte aussi sur la conception d'un outil d'assistance à la fois plus compétent et plus souple, dans le choix des possibilités d'intervention, et de négociation avec l'opérateur.

L'analyse détaillée des activités de coopération a mis en évidence l'importance des interfaces dans la constitution d'un espace d'informations partagées entre les deux contrôleurs. Le soutien externe à l'activité individuelle que peut apporter une aide doit aussi être considéré du point de vue du soutien à la coopération homme-homme. Sur ce point, les aides apportées ont eu un effet positif. L'étude de la coopération homme-machine avec un système aussi fruste que SAINTEX ne pouvait pas produire de résultats vraiment déterminants, mais elle a montré l'effet de l'implication dans les décisions d'affectation sur l'attitude du contrôleur vis-à-vis de la machine. Il apparaît clairement que le contrôleur est plus critique devant la proposition de SAINTEX lorsqu'il est impliqué dans l'affectation que lorsqu'il ne l'est pas. Ce résultat rejoint une observation de Roth, Bennett et Woods (1988) désormais bien connue selon laquelle un utilisateur actif (impliqué dans l'activité de la machine) permet au système homme-machine d'atteindre une meilleure performance que lorsqu'il se comporte comme un serveur passif.

L'ensemble de ces données nous permet maintenant de donner une nouvelle structure à la répartition dynamique de tâches, en terme de définition de l'activité des opérateurs, de la ou des tâches partagées, ainsi que dans la mise en œuvre de la coopération. Ces différents aspects sont discutés et réorganisés au cours du cinquième chapitre.

Chapitre V

Conclusions et perspectives

1. Introduction.

Alors que le quatrième chapitre a mis en exergue les activités des contrôleurs aériens au travers de modèles techniques et cognitifs sur le savoir-faire et le savoir-coopérer, ce cinquième chapitre tente de synthétiser les résultats et de les exploiter pour enrichir ces modèles et de formuler de nouvelles propositions sur les formes coopératives et sur les outils d'assistance.

Après introduction, la seconde partie de ce chapitre exprime les résultats de SPECTRA V2 en terme de savoir-faire et de savoir-coopérer. Des modifications sont apparues sur le comportement des contrôleurs, elles sont analysées et généralisées.

A partir des résultats obtenus dans la partie précédente, la troisième partie propose une extension de la définition des formes de Schmidt, et tente de répondre à la problématique de la coopération multiniveau. Le chapitre quatre ayant montré que la coopération multiniveau pouvait ne pas présenter une unique forme de coopération, nous essaierons donc d'apporter un soutien à la coopération par la construction d'un espace de travail commun.

La quatrième partie exploite les notions présentées dans la seconde et troisième partie pour la construction d'une nouvelle plate-forme expérimentale dans le cadre du Contrôle de Trafic Aérien appelée AMANDA (Avoidance MANeuver Delegation to Aircraft).

2. Synthèse des résultats sur le savoir-faire et le savoir-coopérer

Cette partie synthétise les résultats issus des chapitres trois et quatre englobant l'analyse des réponses aux questionnaires, l'analyse des performances et l'analyse des verbalisations simultanées des contrôleurs. Ils font apparaître une divergence entre les sentiments exprimés par les opérateurs et l'analyse effective de l'activité développée. Les opérateurs ont exposé leurs sentiments sur les situations expérimentales au travers des questionnaires et de l'estimation périodique de la charge de travail du contrôleur radar. Ils considèrent que les outils d'assistance fournis constituent plutôt une charge supplémentaire qui pourrait les conduire à commettre des erreurs. Au contraire, l'analyse de l'activité développée démontre que les meilleurs résultats sont obtenus dans la condition expérimentale où les contrôleurs sont les plus assistés par les outils.

Cette ambiguïté est connue des psychologues et constitue un élément dont il faut tenir compte dans la définition des outils d'assistance. Ainsi, dans le domaine du contrôle de trafic aérien, comme dans d'autres domaines d'application, les opérateurs ont un a priori sur les nouveaux outils d'assistance, ce qui freine leur intégration. Ce sentiment, appelé misonéisme, est dû à des erreurs passées, erreurs maintenant mieux connues, notamment par un travail pluridisciplinaire. Mais il est aussi nécessaire de prouver aux opérateurs, par des méthodes d'analyse telles que celle présentée dans le chapitre quatre, que les outils d'assistance les ont menés à de meilleurs résultats.

2.1.Modification du savoir-faire des agents

2.1.1. Accentuation mise sur la planification

Le principal résultat porte sur l'organisation de l'activité. Il semble que les outils d'assistance incitent les contrôleurs à adopter un fonctionnement plus anticipatif que réactif. Les tâches sont en effet davantage planifiées. La cause peut être la réduction de la charge de travail des contrôleurs, due à l'affectation de certaines tâches aux outils d'assistance, PLAF et SAINTEX. Mais il est également possible de considérer que les outils d'assistance, par proposition de détection d'incidents potentiels devant celle effectuée par les opérateurs, incitent ces derniers à mener un diagnostic plus précoce. L'analyse des commandes montre que la qualité de la gestion du processus et la sécurité s'améliorent avec la présence des aides à la prédiction. Ce résultat est vrai dans la deuxième condition expérimentale, durant laquelle SAINTEX propose une aide à la prédiction d'incidents et à la résolution. Il est confirmé aussi par l'analyse de la troisième condition expérimentale, où PLAF apporte en plus une prédiction de la charge de travail et une proposition d'affectation des tâches.

La prédiction est évidemment l'une des principales raisons d'un savoir-faire dont la planification occupe une place plus importante. Elle est rarement facile à construire mais le caractère déterministe de nos scénarios en a facilité l'élaboration. Cependant même si un outil d'assistance ne peut proposer qu'une prédiction approximative, la confrontation des analyses construites par l'outil d'assistance et l'opérateur ne peut mener qu'à de bons résultats si elle ne prend pas trop de temps. Il faut pour cela que l'analyse proposée par l'outil d'assistance soit en adéquation avec l'analyse construite par l'opérateur, c'est-à-dire que leurs savoir-faire soient similaires ou s'expriment de façon similaire. Mais il faut faire attention à ne pas demander à cet opérateur de trop approfondir une analyse quand ce dernier dispose déjà d'une solution construite à partir de sa connaissance ou de son expérience. Il se pose alors le dilemme quant à choisir un outil d'assistance ayant des compétences limitées, ou un outil d'assistance plus compétent. Le premier choix a l'avantage de limiter les interférences entre les tâches affectées aux différents agents, et de ce fait de gérer ces interférences. La seconde possibilité impose la définition de principes de négociation, relevant donc d'un savoir-coopérer, pour la gestion des interférences détectées. Pour coopérer, l'opérateur et l'outil d'assistance doivent travailler sur les mêmes éléments du processus en adoptant un même langage de communication. Ces éléments sont évoqués dans le paragraphe 2.2.

Ce problème s'est présenté lors des dernières expérimentations, et les analyses permettent de constater que les éléments manipulés par l'opérateur s'adaptent à ceux manipulés par l'outil d'assistance, dans notre cas des paires d'avions en conflit potentiel. Les résultats laissent supposer que c'est cette structure de trafic qui serait, en partie, à l'origine d'une gestion de trafic plus aisée.

2.1.2. Maintien des agents sur leur savoir-faire

Avant toute étude sur l'activité coopérative des deux opérateurs, il est important de rappeler que l'organisation attribuant les tâches tactiques à l'un des opérateurs, tandis que l'autre assure les tâches stratégiques, s'est avérée correcte et appréciée par les opérateurs. De plus, le rôle de répartiteur de tâches tactiques attribué à l'opérateur "stratégique" est accepté par les opérateurs. Sa faisabilité est validée puisque l'opérateur "stratégique" dispose d'une bonne représentation de l'activité de l'opérateur "tactique".

2.2.Opérationnalisation du savoir-coopérer des agents

2.2.1. La mise en commun des informations et des intentions de chaque agent

L'analyse des résultats fait apparaître qu'avec les outils d'assistance, la coopération homme-homme semble plus aisée. Elle est plus opérationnelle, les opérateurs cherchant à se faciliter mutuellement la tâche, et elle donne lieu à moins de désaccord entre eux sur l'analyse du

processus et sur la détermination de la commande à appliquer. Il semblerait donc que les interfaces associées aux aides créent un “espace commun d’informations partagées” qui favoriserait la coopération homme-homme.

Il semble donc nécessaire de soutenir l’activité coopérative homme-homme en procurant des interfaces communes de travail, sur lesquelles des informations élaborées par l’un des opérateurs sont affichées de façon à être directement accessibles par l’autre opérateur. Bien entendu, le codage de telles informations doit être déterminé au préalable. Ainsi, le partage d’un support d’informations commun permet aux opérateurs, sans échanges verbaux, de connaître la représentation que l’autre opérateur a de la situation, c’est-à-dire son diagnostic et ses intentions. Au cours de nos expérimentations, les principaux symboles manipulés sont la détection de conflits, par désignation de groupes d’avions conflictuels et par utilisation d’un code couleur pour les distinguer, puis par désignation d’informations à surveiller, ou à changer, sur les strips de certains avions.

Le langage commun à l’opérateur et à l’outil assistance consiste, dans nos expérimentations, en un codage de l’information qui répond à des objectifs communs à ces deux agents. Dans notre cas, les objectifs communs sont la détection de conflits, la proposition de résolution de conflit par SAINTEX, la prédiction de surcharge de travail du contrôleur radar par PLAF, et l’affectation de tâches partageables par PLAF. A chaque but est associée une symbolique, les couleurs permettant de distinguer ce qui est réalisé par le contrôleur ou par SAINTEX.

La partie suivante de ce chapitre, traite des outils d’assistance qu’il serait possible de construire et de tester dans le cadre de la coopération homme-machine; le soutien à la coopération homme-homme par élaboration d’interfaces représente l’un des éléments à exploiter. De plus, l’étude de la coopération homme-homme est un terrain favorable à la découverte des critères de bonne coopération, critères à intégrer dans la coopération homme-machine.

2.2.2. La mise en œuvre du partage de tâches

La comparaison des activités coopératives homme-machine, développées au cours des situations expérimentales assistées (situations explicite et explicite assistée), souligne l’effet déterminant de l’accès à la fonction de répartition des tâches. L’analyse des résultats permet en effet de relever que les opérateurs adoptent, vis-à-vis des outils d’assistance, des comportements opposés selon qu’ils sont ou non impliqués dans la décision de répartition.

En effet, si le choix de l’affectation est laissé aux deux opérateurs (situation explicite), alors l’opérateur “tactique”, (contrôleur radar assurant les tâches les plus tactiques) est incité à participer à la décision d’affectation. Cette conclusion provient probablement du fait que SAINTEX ne propose aucune affectation au préalable, et que si les contrôleurs ne décident pas d’affectation toutes les tâches restent à la charge du contrôleur radar. Ce dernier doit donc construire les éléments qui lui permettent de décider la répartition. Pour cela, il doit analyser l’état du processus, comprendre ce que SAINTEX propose, et intégrer cette proposition dans la planification de sa propre activité. Une fois la décision prise, il la transmet à l’opérateur “stratégique”, (contrôleur organique assurant les tâches les plus stratégiques), qui la met en œuvre.

Contrairement à la situation explicite, la situation explicite assistée positionne l’opérateur tactique dans un rôle de récepteur d’informations qui comprend alors l’affectation décidée comme une facilitation. La décision est prise par l’assistance stratégique, PLAF, qui propose et réalise une préaffectation, soit à l’opérateur tactique, soit à l’assistance tactique, SAINTEX. Mais elle peut être modifiée par l’opérateur stratégique. Les résultats montrent que, dans cette situation, les informations sur le comportement des outils d’assistance sont davantage sollicitées mais pour conclure des accords, c’est-à-dire accepter de la part des contrôleurs les propositions émises par les outils d’assistance.

En conclusion à ce paragraphe, il est possible d'affirmer que le choix de l'affectation des tâches par un niveau stratégiquement supérieur au niveau de réalisation de ces tâches est non seulement possible mais conseillé. Il permet de libérer l'opérateur du niveau tactique, de l'analyse de l'assistance tactique. Mais il est indispensable que cet opérateur dispose des informations nécessaires à la maîtrise de l'assistance tactique, notamment qu'elle soit fiable, robuste et surtout prédictible. On rejoint ici les recommandations exprimées par Clarkes (cf. Chapitre I) pour les qualités coopératives des outils d'assistance. Ainsi, de façon tacite, l'opérateur tactique peut planifier son activité en intégrant les intentions et actions de l'outil d'assistance. L'une des possibilités de rendre cet outil plus fiable, robuste et prédictible est d'intégrer son suivi dans les tâches de l'opérateur stratégique. Cet aspect est discuté dans le paragraphe suivant.

3. Proposition de recherche sur la notion d'Espace de Travail Commun

La partie précédente a mis en évidence de quelle façon les outils d'assistance ont amené les opérateurs à modifier leur activité, pour finalement améliorer leur performance. Cependant, les outils d'assistance proposés étaient construits pour répondre à des scénarios déterministes, et les contraintes du processus étudié ne permettent pas encore de les rendre plus performants. Nous nous efforçons ici de montrer comment il est possible de profiter des capacités de tels outils d'assistance tout en palliant leurs inconvénients.

Les outils d'assistance ont modifié l'activité humaine. Ces modifications portent sur deux aspects de l'activité, l'anticipation et l'activité coopérative.

Les opérateurs ont été amenés à effectuer davantage d'anticipation, puis à communiquer ou confronter leur prédiction à leurs partenaires humains et/ou artificiels. Inciter les opérateurs à anticiper conduit à de bons résultats, mais il faut pour cela fournir les outils d'assistance appropriés, notamment des outils de simulation. D'autres études ont pour sujet ce type d'outil d'assistance, dans le domaine du contrôle de trafic aérien, ces outils donnent, par exemple, la possibilité d'extrapoler les trajectoires des avions, pour estimer l'état futur du trafic (Chollet, 93), ou encore permettent de construire une estimation correcte de la future position des avions (Boudes, 96). Cependant, ces outils ne peuvent être utilisés que lorsque les contraintes de temps ne sont pas trop importantes. Une autre forme d'outils de simulation est l'évaluation de décision. Elle peut se réaliser en parallèle de l'activité de l'opérateur, donc sans le dérouter de son activité en cours.

Il faut aussi favoriser l'activité coopérative en incitant les opérateurs à prévenir leurs partenaires de leur analyse du processus et de leur intention d'actions. Qu'il s'agisse d'un partenaire humain ou artificiel, la communication se réalise au moyen d'un "espace de travail commun". Cet espace ne peut être uniquement verbal et doit être matérialisé de façon à ce que le partenaire humain puisse disposer de l'information à tout moment. Il doit être de plus informatique pour que le partenaire artificiel puisse accéder à l'information.

Dans notre étude, nous avons jusqu'à présent distingué deux niveaux d'activité. D'autres niveaux existent et peuvent être exploités de façon à étendre et favoriser la coopération; c'est le sujet du paragraphe suivant.

3.1. La coopération multiniveau.

Lors de l'étude de la répartition dynamique de tâches, nous avons constaté qu'il était possible de dégager deux niveaux d'activité, l'un dit stratégique, dont l'objectif est la construction de stratégies pour la planification de l'activité, l'autre, dit tactique, décide des ordres finaux compte tenu des événements imprévus. Mais cette structure peut se généraliser par extension du niveau stratégique vers des niveaux dont l'activité est encore plus stratégiques, et du niveau tactique vers des niveaux dont l'activité est encore plus tactiques. Chaque niveau dispose de compétences propres. Et la complétude des compétences conduit à l'obtention de l'objectif final (Lemoine, 95-2). La figure V-1 donne une représentation de ce type d'organisation.

Cette représentation met en évidence la possibilité de définir la coopération en fonction de deux dimensions, le niveau d'abstraction de l'activité et le nombre d'agents. A un niveau d'abstraction sont associés une compétence et un objectif. Les niveaux d'abstraction peuvent adopter une structure hiérarchique, ou géographique ou autre. Les agents présents à un niveau d'abstraction disposent des mêmes compétences, mais de capacités différentes. Les trois formes de coopération, au sens de Schmidt, apparaissent. Les premières interviennent entre deux agents d'un même niveau. Ils disposent des mêmes savoir-faire pour répondre à un objectif commun et leurs différences en terme de capacité permet de définir les critères de répartition. Les formes de coopération sont alors du type augmentatif, et/ou confrontatif (cf. chapitre I).

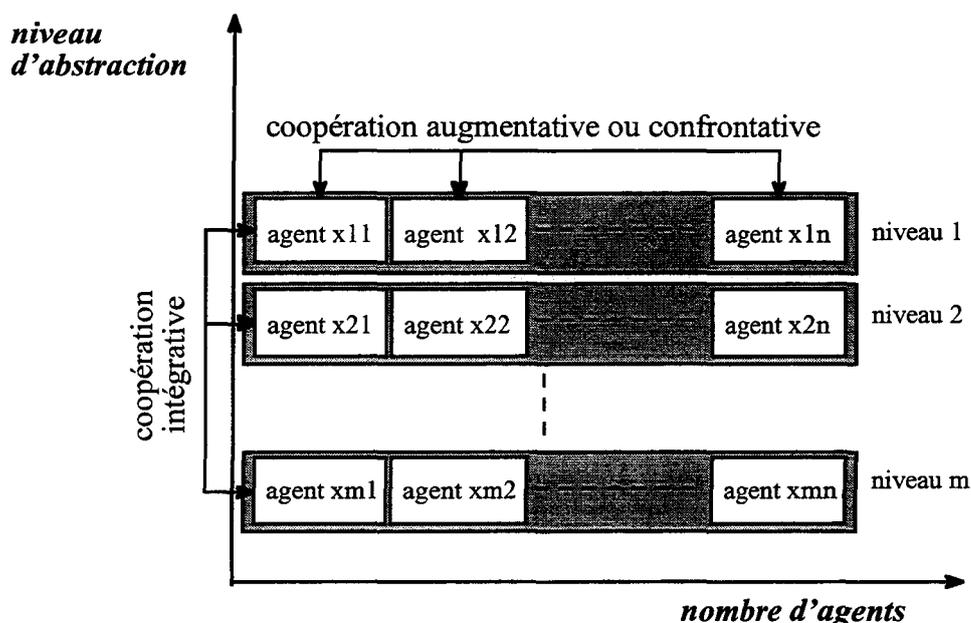


Figure V-1: Axes de coopération

L'autre forme de coopération s'exerce entre les niveaux d'activité. Dans ce cas, les objectifs et les compétences sont différents. Elle est du type intégratif. La coopération a donc pour but d'intégrer les résultats obtenus par chaque niveau. Mais elle doit aussi assurer la remontée des informations des niveaux tactiques aux niveaux plus stratégiques. C'est dans cette forme de coopération que s'intègre la répartition dynamique de tâches. Un agent du niveau x décide d'affecter une tâche T à un agent du niveau $x-1$, plus tactique, en fonction de la capacité de l'agent répondant le plus aux exigences de la tâche T .

Ainsi, l'objectif général de régulation du procédé est décomposé en sous-objectifs, un sous-objectif correspondant à un niveau d'abstraction (cf. figure V-2).

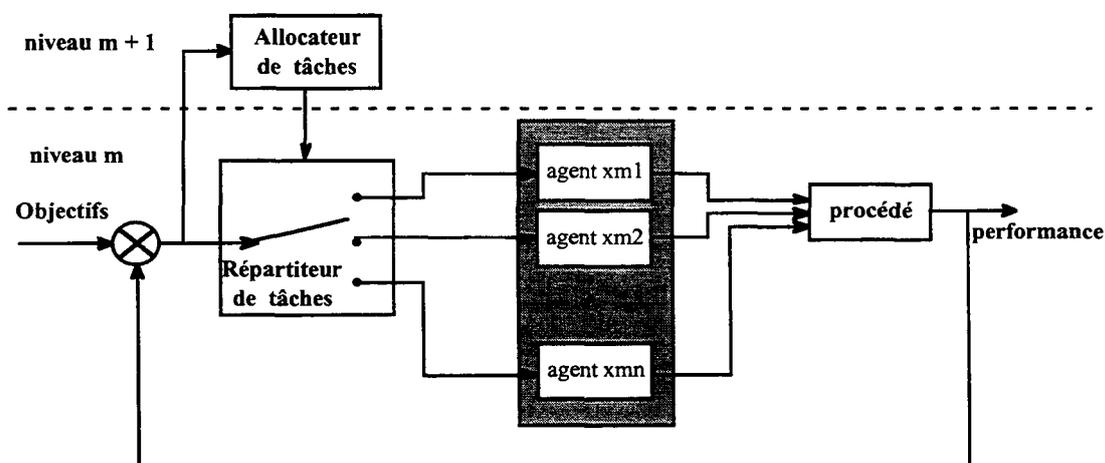


Figure V-2 : Réponse à un sous-objectif de la régulation du procédé

L'exemple de l'expérimentation présentée dans les chapitres précédents permet d'illustrer une telle définition de la coopération. Dans notre exemple, les niveaux d'activité considérés sont les niveaux tactique et stratégique. Chaque niveau d'abstraction est composé de deux agents, l'un est humain, l'autre artificiel. Les agents du niveau stratégique ont un même objectif, la détection des conflits en entrée de secteur et la répartition des tâches; les agents du niveau tactique ont l'objectif commun de détecter les conflits à l'intérieur du secteur et de les résoudre. Cependant ces agents ont des capacités différentes. L'un des points forts de l'agent artificiel est sa fiabilité quant à la détection de conflits. L'agent humain peut en oublier. Inversement, l'agent humain est beaucoup plus souple que l'agent artificiel quant au calcul du meilleur compromis pour résoudre un conflit. Les objectifs sont différents mais complémentaires. Dans le domaine du contrôle de trafic aérien, nous pouvons extraire cinq niveaux (cf. figure V-3) du plus stratégique au plus tactique.

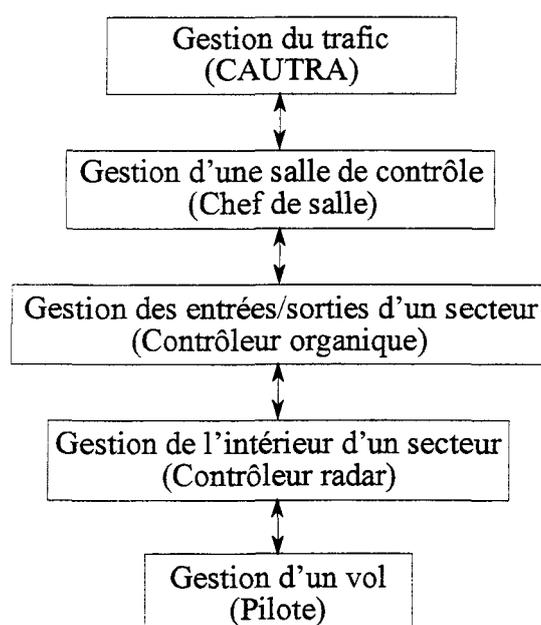


Figure V-3 : Niveaux de gestion du trafic aérien.

Les plans de vol sont déposés par les compagnies aériennes et transmis aux centres de contrôles. Ces plans de vol sont transmis au chef de salle des centres de contrôle. Le chef de salle décide du nombre de postes de contrôle à ouvrir en fonction de la densité du trafic. Les contrôleurs organiques de ces postes assurent la gestion des entrées/ sorties des avions de leur secteur. Puis le contrôleur radar envoie des ordres aux pilotes compte tenu des contraintes du trafic et des plans de vol.

Il est maintenant d'actualité d'intégrer dans ce système les pilotes. En effet, leur rôle dans la prise de décision finale est de moins en moins passif puisque les pilotes disposent aujourd'hui de nouveaux outils d'assistance. Ces outils d'assistance fournissent des informations plus fines que celles dont disposent les contrôleurs sur l'environnement de l'avion (information sur les avions environnants, météorologie, ...). Dans certaines conditions, lorsque la stratégie doit être prise et appliquée dans un bref délai, les pilotes sont à un niveau plus tactique que celui des contrôleurs radars, puisqu'ils sont plus à même de prendre la décision finale, et plus proche de la commande.

Dans la plupart des domaines industriels, ces structures sont bien connues, mais les informations ne font que transiter d'un niveau à l'autre, le plus souvent du haut vers le bas, et malheureusement sans coopération, c'est-à-dire sans justification, sans négociation. Ce type d'organisation étant fixé, le paragraphe suivant présente une forme possible pour "l'espace de travail commun".

3.2.L'Espace de Travail Commun.

A partir des mécanismes de coopération présentés ci-dessus, il est possible de proposer un espace de travail commun à l'ensemble des agents. Les niveaux d'abstraction n'ont pas les mêmes besoins en terme d'information. L'Espace de Travail Commun d'un niveau d'abstraction $m+1$ est une généralisation (au sens de l'Apprentissage Symbolique Automatique) de toutes les informations disponibles au niveau m . En effet, nous avons vu que pour faciliter la coopération, les agents devaient disposer des diagnostics construits par les autres agents, ainsi que de leurs intentions d'action. Ces éléments doivent apparaître sur une interface, lieu de réflexion et de négociation.

La coopération se construit autour d'un espace de travail commun à l'ensemble des agents humains et/ou artificiels. Chaque agent alimente cet espace de travail en indiquant ses diagnostics et ses intentions d'actions. Les autres agents peuvent ainsi prendre connaissance de ces informations à tout moment.

Lors de la confrontation, deux phénomènes peuvent alors apparaître :

- les agents disposent d'une représentation différente du processus (pas de référentiel commun), et sont alors en désaccord sur l'analyse de la situation,
- les agents sont en désaccord sur les actions à entreprendre (interférences entre buts). La décision finale est prise par l'agent responsable, à la suite ou non d'une négociation.

L'ajustement du référentiel commun peut se faire de différentes façons :

- si les agents sont humains et qu'ils peuvent communiquer, oralement alors l'ajustement peut être rapide,
- si les agents sont humains mais ne peuvent communiquer qu'au travers d'une interface, ou s'il s'agit d'un agent humain et d'un agent artificiel, alors l'ajustement nécessite la construction d'une interface spécifique au dialogue.

En plus d'un outil de communication, cette interface apporte un soutien à la mémorisation d'analyses et d'actions préparées. La structure de communication d'un tel espace de travail peut se présenter sous la forme suivante (cf. figure V-4).

Cette figure se limite à deux niveaux d'abstraction ($m+1$ et m) mais le principe peut se généraliser à plusieurs niveaux. Les quatre espaces $(m+1)_1$, $(m+1)_2$, m_1 , m_2 définissent les savoir-faire des quatre agents. En ce qui concerne les agents artificiels, l'accès à ces informations est aisé puisqu'elles constituent le résultat des moteurs d'inférence implantés. En ce qui concerne les agents humains, la seule possibilité d'accéder à ces informations est de demander explicitement aux opérateurs de fournir leur compréhension du procédé au travers des trois éléments du modèle de savoir-faire que nous avons déjà adopté (cf. chapitre IV § 2.2.1), à savoir : *l'élaboration d'information* du procédé, le *diagnostic* qu'ils ont élaboré, *les prises de décisions* qu'ils ont effectués. Les espaces de travail ainsi définis sont confrontés au sein d'un module informatique appelé Espace de Travail Commun. Il permet donc la mise en commun des savoir-faire des différents agents impliqués et la correction des erreurs potentielles sur ces savoir-faire par le savoir-coopérer des agents.

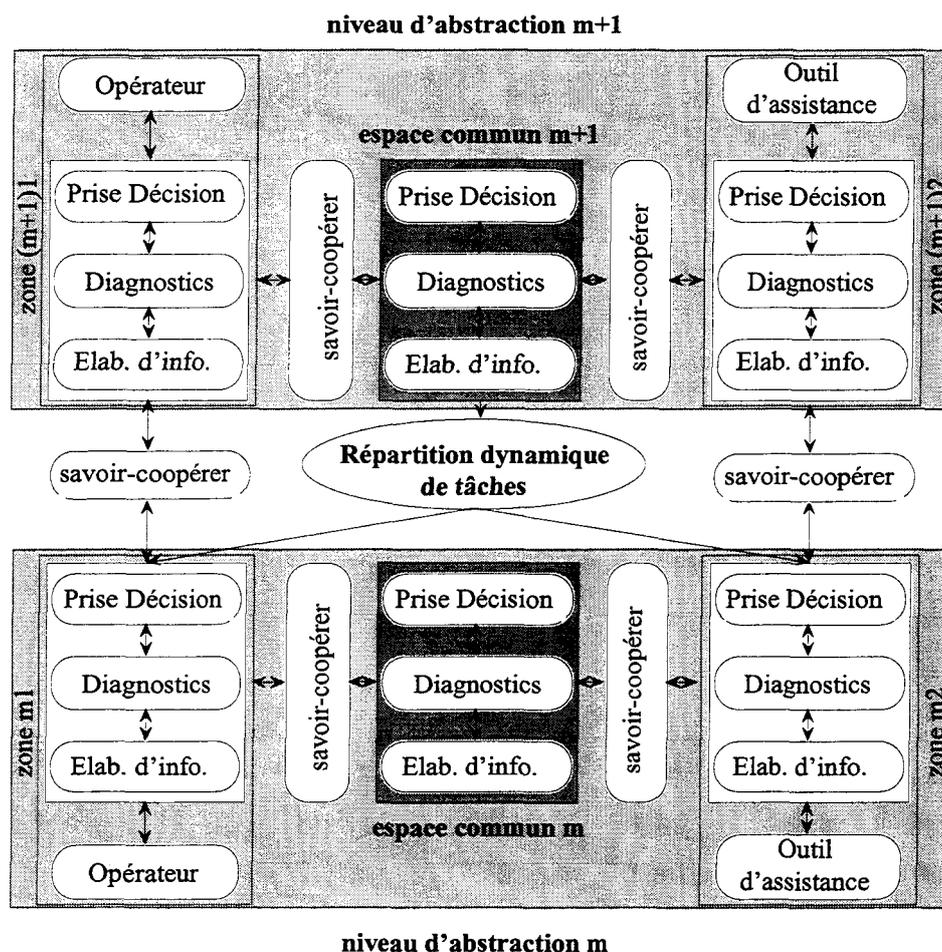


Figure V-4 : Structure de communication à partir d'un espace de travail commun.

L'espace de travail commun doit faciliter la détection des interférences entre agents et la résolution de ces interférences, en permettant la négociation des agents sur les trois éléments présentés ci-dessus :

- la négociation sur *l'élaboration d'information* du procédé permet aux agents de se construire un référentiel commun, en reconnaissant les mêmes éléments du procédé, et en leur associant les mêmes attributs,
- la négociation sur *le diagnostic* du procédé conduit les agents à tirer les mêmes conclusions sur l'état du procédé,
- la négociation sur *les prises de décisions* sur le procédé amène les agents à définir un plan commun.

L'obtention d'un accord sur ces trois éléments ne se fait pas obligatoirement par ordre chronologique, par un accord sur l'élaboration d'information, puis sur le diagnostic, puis sur les prises de décisions, mais la détection d'une interférence sur l'un de ces éléments doit amener les agents à confronter l'élément antérieur.

En effet, un désaccord sur une intention d'action peut seulement provenir d'un désaccord sur l'action qu'un agent désire mettre en œuvre. Mais il peut aussi provenir d'un désaccord sur le diagnostic du procédé. En contrôle aérien, deux contrôleurs ont par exemple identifié un conflit dans un certain contexte, mais ils sont en désaccord sur le type de résolution à adopter; la différence peut porter sur les conséquences de ces résolutions, mais le désaccord peut aussi provenir d'un diagnostic différent du trafic. Par exemple, le conflit n'est pas analysé de la même

façon, par le contrôleur et par le système d'aide de résolution; notamment le système d'aide n'a pas intégré dans son diagnostic la présence d'un troisième avion dont la trajectoire peut être modifiée par le contrôleur, et qui rentre alors en interférence avec le conflit détecté.

De même, un désaccord sur le diagnostic du procédé peut être une conséquence d'un désaccord sur l'élaboration d'information du procédé. Pour reprendre l'exemple du conflit aérien, une élaboration d'information différente peut consister à oublier d'intégrer un paramètre d'un vol (la vitesse, le taux de montée, ...). Cette idée a déjà été émise et implantée en 1990 dans la thèse de Taborin (Millot, 98).

Cette notion d'espace de travail commun a déjà fait l'objet d'études dans diverses disciplines (multi-agent, psychologie cognitive, ergonomie, ...) :

- Dans le domaine du contrôle de trafic aérien, Bentley (1992) présente cette notion sous la forme d'*espace d'information partagé*. Pour l'auteur, cet espace reflète le procédé externe contrôlé. Il est actualisé par les contrôleurs et par les entrées de capteurs extérieurs tels que les radars, les transpondeurs. L'espace d'information partagé offre un format de représentation pour différents utilisateurs, sur différents postes, pour permettre la manipulation d'entités partagées.
- Decortis et Pavard (1994) définissent l'*environnement cognitif partagé* comme étant un ensemble de faits et d'hypothèses manifestes, que des agents ont en commun, et qui constitue un sous-ensemble de l'univers cognitif de chaque agent.
- Royer (1994) précise qu'un système est d'autant plus coopératif que la coopération implique plus de niveaux, les niveaux étant la perception, l'analyse, la décision et l'action. La coopération ne porte donc pas uniquement sur la coordination des actions, mais aussi sur la *fusion* des perceptions, sur la *concertation* des analyses, sur la *convergence* des décisions. Pour cet auteur, coopérer au niveau de la perception et de l'analyse revient à *partager des croyances*. Les croyances sont des représentations internes du monde et des autres agents, à un instant donné.
- Pour Bressolle (1996), les contrôleurs aériens développent un *environnement cognitif mutuel*. Le concept d'environnement cognitif mutuel (ou commun) est défini par Sperber et Wilson (dans (Zorola-Villarreal, 95)), comme tout environnement cognitif partagé dans lequel est manifeste l'identité des agents qui partagent cet environnement.
- Jones (1997) intègre cette notion dans la construction "d'une assistance intelligente pour l'organisation de l'activité", ISAM (Intelligent Support for Activity Management). ISAM propose une infrastructure pour partager une représentation de buts, un raisonnement sur les buts, les exigences de l'activité dans un contexte d'évaluation de l'état du système. Il inclut aussi la responsabilité qui dénote quel agent fera, fait ou a fait une activité, ainsi que l'explication des interdépendances entre les activités.

Le principe de l'espace de travail commun respecte le fait qu'il ne s'agit pas de retirer une partie du procédé au contrôle de l'opérateur, mais au contraire de fournir un environnement de contrôle plus riche, puisqu'il confronte les réflexions de plusieurs agents. Ainsi, le savoir-faire des opérateurs est entretenu, leur permettant de reprendre en main, dans de bonnes conditions, un procédé privé de ses automatismes.

L'obtention d'un accord entre les différents agents d'un même niveau doit conduire à une conclusion sur la répartition de tâches à appliquer sur un niveau plus tactique, c'est-à-dire une préparation des tâches (décomposition, ou regroupement), et l'affectation de ces tâches aux agents. Les résultats des études SPECTRA V1 et SPECTRA V2 ont mis en évidence qu'il est possible d'utiliser un modèle des compétences et capacités des agents artificiels pour décider la répartition dynamique de tâches, mais que l'absence d'un tel modèle pour l'opérateur humain ne

permet pas encore de définir un pilotage automatique du répartiteur. C'est pourquoi l'intégration de l'activité de l'opérateur humain doit se faire par une interface lui permettant d'entrer ses intentions, diagnostics, représentation du procédé.

L'interface entre l'opérateur et l'espace de travail commun peut adopter plusieurs formes (graphiques, vocales, ...); quelques exemples du contrôle aérien sont présentés dans le paragraphe suivant.

L'aspect théorique de l'Espace de Travail Commun étant maintenant défini, la partie suivante présente une application de ce principe au contrôle de trafic aérien.

4. Application au Contrôle de Trafic Aérien

4.1. Contexte d'intégration de l'Espace de Travail Commun

La navigation aérienne a mis en place de nombreuses études visant à développer de nouvelles technologies permettant de diminuer la charge de surveillance et le taux d'intervention du contrôle au sol. Ces techniques s'attachent à renforcer les liaisons sol / bord, à mettre en place des outils de contrôle et d'évitement automatique à bord des avions, ainsi qu'à construire des interfaces contrôleur/machine intelligentes.

4.1.1. Implication des pilotes dans les tâches de contrôle.

Aujourd'hui déjà, le pilote peut être amené à participer aux tâches de contrôle sol, à la demande des contrôleurs radars. La participation du pilote consiste généralement à fournir aux contrôleurs des informations précises sur l'environnement de l'avion. Ces informations portent sur la météorologie, son positionnement vis-à-vis des autres avions. Ces échanges pilotes/contrôleurs ont souvent pour but d'éviter d'appliquer des manœuvres d'évitement de conflit, ou de perturbation trop coûteuses au vol.

Les études en cours tentent d'intensifier ces échanges et de déplacer la frontière de responsabilité pilote/contrôleur vers le pilote, par une délégation à bord plus ou moins prononcée. L'une de ces études a notamment été commentée par Falzon lors du congrès Explication de 1996 (Falzon, 96). L'exemple présenté par l'auteur est un outil en cours de test, le data-link. C'est une liaison sol/bord entre pilotes et contrôleurs qui permet la communication par écrans interposés. Le data-link tente, par imposition d'un nouveau type de communication, de fiabiliser la communication sol/bord qui, jusqu'à présent, est principalement vocale.

Il faut en effet préciser que l'augmentation du trafic conduit à une saturation du canal radio et à des interférences entre messages. A cette mauvaise qualité du son, viennent se greffer les problèmes de langues maternelles des pilotes et des contrôleurs. De plus, à ces difficultés de communication s'ajoute le fait que, pour un secteur donné, l'ensemble des pilotes ne disposent que d'une fréquence unique. Ainsi un pilote doit entendre tout ce qui est dit par le contrôleur et les autres appareils pour identifier les messages qui le concernent.

Cependant, les conclusions amènent à reconsidérer cet apport, et ce principalement en ce qui concerne la coopération homme-homme. Ce principe de communication unique par data-link (sans liaison radio) a en effet conduit à l'isolement des pilotes du reste du trafic. Les expériences menées ont mis en évidence que les pilotes se construisent une représentation du trafic à partir des échanges verbaux pilotes/contrôleurs. Falzon remarque que le caractère public de l'activité des différents agents est un facteur important du travail collectif. L'ostentation, c'est-à-dire, la capacité à rendre visible son activité propre, contribue à construire le contexte commun, et à permettre l'élaboration par chacun d'une vision cohérente de la situation globale.

Toutes ces remarques pour démontrer combien les contrôleurs et les pilotes ont besoin de disposer de la même représentation du trafic pour "se comprendre". L'ordre du contrôleur est appliqué par le pilote s'il est compris et cohérent avec la représentation que le pilote se fait de la situation. Une représentation commune de la situation constitue "une explication" de l'ordre.

4.1.2. Représentation du trafic

Les contrôleurs maintiennent à jour en permanence un ensemble de données structurées de telle façon que le traitement en soit préparé (Bisseret, 95). La structure de ces données est le résultat d'un filtrage de l'ensemble des données. Le filtre vise principalement à sélectionner et hiérarchiser les éléments; ils identifient notamment les avions conflictuels ou non, ainsi que les avions dont la procédure impose un suivi et des actions plus fréquentes. Bisseret note l'importance du mode de communication de données imposé par les intermédiaires (strip, radar, ...).

Le principe de filtrage se retrouve dans le projet ERATO. L'objectif est de réduire le nombre d'objets à manipuler, et donc à mémoriser (Chatty, 96-1). L'environnement construit par ERATO prévoit de filtrer les avions qui ne posent pas de problème, en les rendant moins visibles que les autres. Il incite donc les contrôleurs à gérer des groupes d'avions "à problèmes" plutôt que des avions isolés. Ce mode de gestion contribue à la planification de l'activité.

4.1.3. Reconnaissance de comportement des contrôleurs

Au sein du Centre d'Étude de la Navigation Aérienne, des études tentent, par diverses techniques, de développer des outils qui permettent de reconnaître certains comportements du contrôleur, donc d'éviter de demander au contrôleur de renseigner le système informatique. Ces projets se nomment PAROLE et GRIGRI.

PAROLE a pour sujet la reconnaissance vocale (Lemoine, 94). Le principal objectif est de faciliter la communication sol / bord, entre le contrôleur radar et le pilote, en affichant les instructions de vol du contrôleur sur un écran du tableau de bord des pilotes. Les raisons de cette recherche sont semblables à celles du data-link présenté ci-dessus. L'obtention d'un tel résultat éviterait au contrôleur radar de devoir entrer les instructions via un écran informatique; la charge de travail serait ainsi réduite. Mais ce projet ne permet de connaître que les ordres finalisés des contrôleurs. Il ne permet pas de maîtriser l'analyse construite par les contrôleurs. Le projet GRIGRI a cet objectif.

Le projet GRIGRI tente de construire un outil de reconnaissance symbolique (Chatty, 96-2). Comme présentée dans le chapitre II, la future position de travail des contrôleurs aériens, doit intégrer à long terme le stripping électronique. Les strips abandonnent leur aspect papier pour s'afficher sur un écran tactile équipé d'un crayon électronique. Ainsi les strips peuvent être manipulés sensiblement de la même façon qu'ils le sont aujourd'hui, mais aussi, et surtout, le crayon électronique permet aux contrôleurs de continuer à souligner sur les strips les informations importantes des vols. Pour cela les contrôleurs utilisent des symboles. Un certain nombre de ces symboles est commun à l'ensemble des contrôleurs (notamment par leur formation), ce qui implique qu'ils sont connus et reconnaissables. Ils sont semblables à ceux déjà présentés dans le projet SPECTRA V2. Ces symboles sont, par exemple, un trait pour désigner la balise de mise en directe, un cercle pour marquer un niveau vol à changer. Ils représentent le diagnostic construit par le contrôleur, ainsi qu'une première préparation d'action. Non seulement il permet au contrôleur de mémoriser le travail déjà effectué, mais en plus il peut permettre au système informatique de suivre ce travail, et de l'analyser.

La connaissance de ces formes d'assistance conforte notre recherche quant à construire un espace de travail commun, renseigné par le système d'aide et par l'opérateur humain. La partie suivante présente, avec plus de détails, l'intégration d'un tel outil d'assistance.

4.2. Spécification de AMANDA.

4.2.1. Objectifs de AMANDA

Le projet AMANDA, démarré fin 1996 et en cours actuellement, implique, comme dans SPECTRA V2, la prise en compte du contrôleur organique et du contrôleur radar, mais également des pilotes. Ces agents occupent des niveaux fonctionnels différents, comme cela a été détaillé par les parties précédentes. La mise en œuvre de ce projet repose sur la possibilité de *délégation de responsabilité des contrôleurs aériens vers les pilotes*. Sous certaines conditions, un avion, ou un groupe d'avions, pourra accepter ou refuser de prendre la responsabilité de décider de la commande à appliquer.

Le principal objectif d'AMANDA est une meilleure adaptation des outils d'assistance à l'activité humaine. En particulier, le projet s'oriente vers une meilleure adaptation des possibilités du système d'aide à la gestion globale du trafic menée par le contrôleur. Le caractère adaptatif de ce type de répartition répond davantage aux aspects incertains et imprécis liés à la dynamique du trafic étudié (aspects non gérés lors de la dernière expérimentation). Les projets SPECTRA cherchaient à réguler la charge de travail des contrôleurs aériens en affectant certains problèmes au système d'aide. Dans le projet AMANDA la régulation consiste à affecter au système d'aide des tâches plus ou moins finalisées. Les tâches partageables ne consistent plus en effet en la tâche "macroscopique" qu'était la prise en charge totale d'un conflit. L'analyse de l'activité cognitive des contrôleurs, et les critiques apportées par ces derniers (cf. Chapitres III et IV) incitent à définir les tâches à un niveau plus fin. Les tâches sont définies par les opérateurs puis affectées au système d'aide. Ce changement permet d'augmenter le nombre de tâches partageables et ainsi d'utiliser la capacité du système d'aide à gérer plusieurs tâches parallèles.

Les tâches partageables peuvent adopter plusieurs niveaux de précision. En acceptant le modèle simplifié de processus décisionnel de l'opérateur, comme étant l'enchaînement des activités d'élaboration de stratégie, d'élaboration d'action, de surveillance et de suivi (cf. Figure V-5), il est possible de considérer que la tâche partageable englobe l'une de ces activités ou un ensemble de ces activités sur un problème donné (Debernard, 97). Le processus décisionnel de l'opérateur évolue en effet suivant des étapes de raffinement progressif de la solution. La décision peut être très schématique, par exemple tourner l'AFR à droite, jusqu'à être complètement spécifiée, par exemple tourner l'AFR à droite de trente degrés dans trois minutes. Ce raffinement est dû, d'une part à l'introduction progressive de contraintes qui vont réduire les degrés de liberté laissés à la décision, et d'autre part à la diminution des incertitudes prises en compte par le contrôleur. La tâche n'est partageable que si l'opérateur décide de l'affecter au système d'aide pour finaliser une décision schématique et/ou l'appliquer.

La compétence du système d'aide reste limitée. Le niveau de compétence utilisé est fonction des besoins des contrôleurs. Plus une tâche est prise en charge tôt par le système d'aide, plus il doit être compétent. Les cas extrêmes d'intervention des outils d'assistance sont les suivants. L'implication la plus importante du système d'aide se présente lorsqu'il détecte un problème et le prend seul en charge jusqu'à sa résolution. L'implication minimale est la simple exécution d'une décision prise par les contrôleurs.

Contrairement au projet SPECTRA, l'initiative est aux contrôleurs. La prise en charge d'un problème par le système d'aide est une demande explicite des contrôleurs. Et la demande n'est satisfaite que si le système d'aide en a la compétence. Dans le cas contraire, la tâche reste à la charge des contrôleurs ou des pilotes.

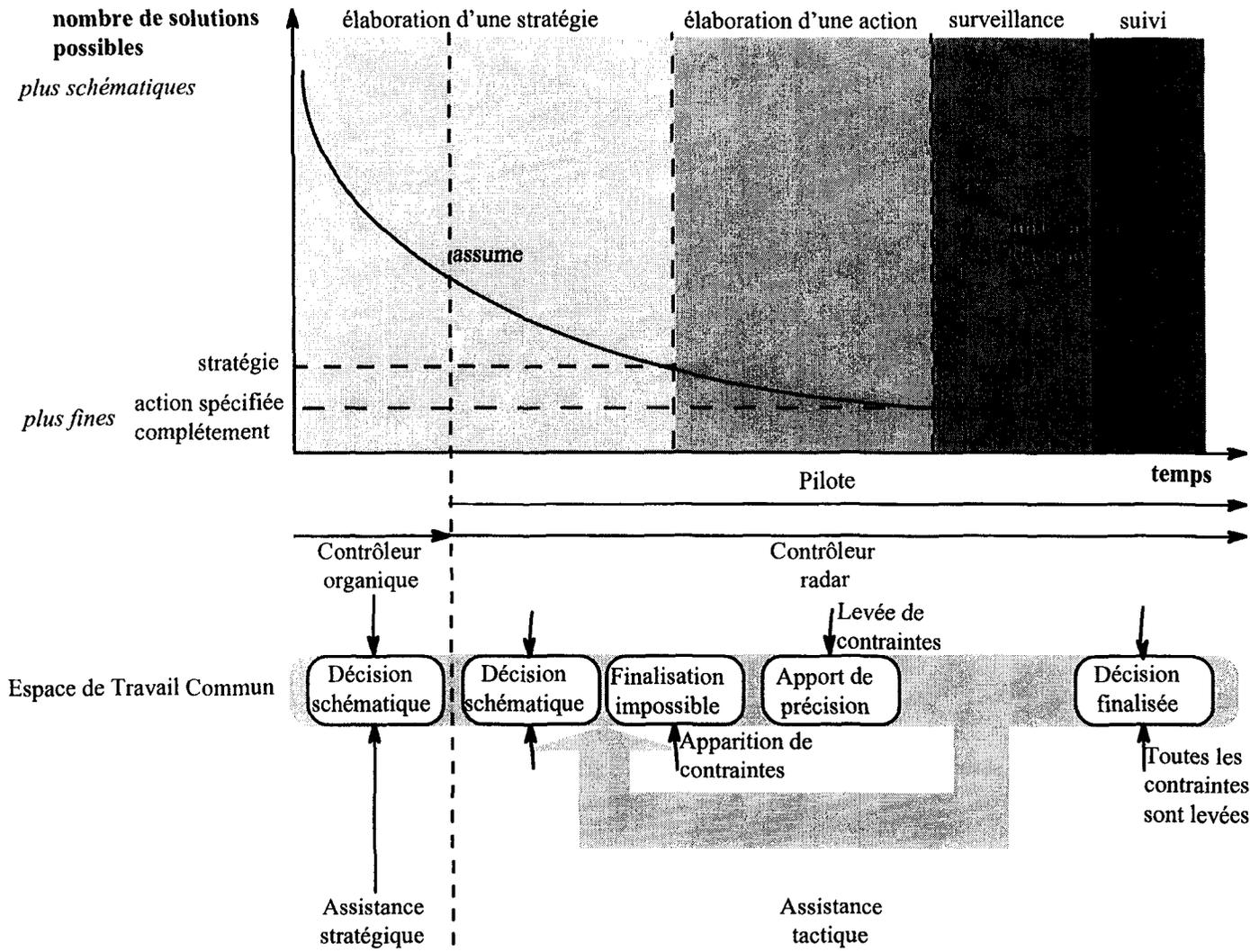


Figure V-5 : Evolution de l'état de l'affinement des décisions au cours du temps et intégration des fonctionnalités de l'outil d'assistance dans les étapes décisionnelles des contrôleurs

4.2.2. Délégation de tâches

Il ne s'agit plus ici de répartition dynamique de tâches dans le sens où il n'y a pas de choix d'affectation suivant des critères prédéfinis. Le principe adopté repose sur une délégation de tâches décidée par les contrôleurs. Ce paragraphe a pour objectif de présenter les différentes possibilités de délégation.

L'organisation contrôleurs/pilotes est la suivante. A partir des données issues du trafic (radar ou data-link), le contrôleur organique ou le contrôleur radar détecte un problème. Le problème est, soit le non respect d'un plan de vol, soit un conflit. L'urgence de la prise de décision, et la difficulté du problème déterminent la stratégie de résolution, notamment la répartition des tâches. L'urgence de la prise de décision est liée à l'importance du délai défini par la date de détection du problème et la date maximale à laquelle la résolution doit être appliquée pour éviter le problème. La difficulté est liée à l'urgence et/ou à la complexité du trafic (nombre d'interactions possibles avec d'autres avions, type d'action à réaliser).

Le cheminement de la prise de décision peut être le suivant. Sur un problème donné, le niveau stratégique (le contrôleur organique ou l'outil d'assistance stratégique) dispose des informations nécessaires à la spécification d'une décision schématique. La préparation de cette décision est entrée sur l'Espace de Travail Commun (ETC) (cf. figure V-5 et figure V-6). Elle est ainsi mise à disposition du niveau tactique (le contrôleur radar et l'outil d'assistance tactique). La décision schématique peut également être définie par le niveau tactique, notamment par le contrôleur radar s'il dispose de temps.

Deux possibilités apparaissent. La première est que le contrôleur radar, ou l'outil d'assistance tactique, finalise la décision schématique. Certaines typologies de trafic permettent de décider très tôt des commandes à appliquer. Ce peut être le cas d'un changement de niveau pour un vol qui n'est pas à son CFL. Cependant, la plupart des décisions doivent attendre que le trafic évolue pour pouvoir être prises.

Des décisions schématiques étant entrées sur l'ETC, l'outil d'assistance tactique tente de les finaliser. La décision schématique est entrée par un contrôleur pour répondre aux exigences du modèle de trafic dont il dispose. Il se peut que le modèle de trafic de l'outil d'assistance tactique ne soit pas identique, en particulier en ce qui concerne les avions impliqués dans cette décision. L'outil d'assistance ne peut alors finaliser la décision schématique, et doit indiquer aux contrôleurs ce qui gêne la finalisation. Il apparaît alors une négociation entre l'outil d'assistance tactique et les contrôleurs. La négociation peut porter sur les trois éléments présentés dans la partie précédente, à savoir l'élaboration d'information du procédé, son diagnostic et la prise de décision (cf. § 3.2). Les contrôleurs décident de renseigner l'outil d'assistance en relâchant les contraintes détectées sur le trafic, ou finalisent eux-mêmes la décision schématique. Pour ajuster les modèles internes de trafic des agents humains et artificiels, il se peut que de nombreuses négociations soient nécessaires. Il faut veiller à ce que ces échanges ne pénalisent pas les contrôleurs. Plus les outils d'assistance seront renseignés sur les représentations, diagnostics et intentions des contrôleurs, plus les échanges outil d'assistance/contrôleurs seront concis. Si, malgré les négociations, l'outil d'assistance ne peut calculer la commande, alors il est possible que les contrôleurs aient commis une erreur; celle-ci est alors soulevée pour être corrigée.

A priori, il est possible de supposer que si les contrôleurs ont un modèle de trafic identique, les deux contrôleurs pourront interagir avec les outils d'assistance, en fonction de leur disponibilité. Si les contrôleurs ont des modèles de trafic différents alors l'ajustement peut permettre de lever des erreurs. L'ETC est donc un soutien à la coopération homme-machine, mais aussi à la coopération homme-homme. La décision finalisée est entrée sur l'ETC pour être envoyée au pilote au moment opportun.

La seconde possibilité est la définition de contraintes spatiales et temporelles, par le contrôle sol, sur un ou plusieurs avions, et sous respect de ces contraintes, de proposer aux pilotes de définir la commande qui conduira à la résolution du problème. Les contraintes définies par le contrôle

au sol conduisent à partitionner le trafic, c'est-à-dire à créer des sous-secteurs dont le contrôle serait délégué aux pilotes des avions impliqués. Les pilotes acceptent ou refusent de prendre en charge cette résolution. S'ils refusent le contrôle sol doit définir l'ordre de résolution. S'ils acceptent, en supposant que l'ensemble des pilotes trouve un accord commun, alors les pilotes disposent de l'assistance ASAS pour résoudre le problème, sous respect des contraintes imposées par le contrôle sol.

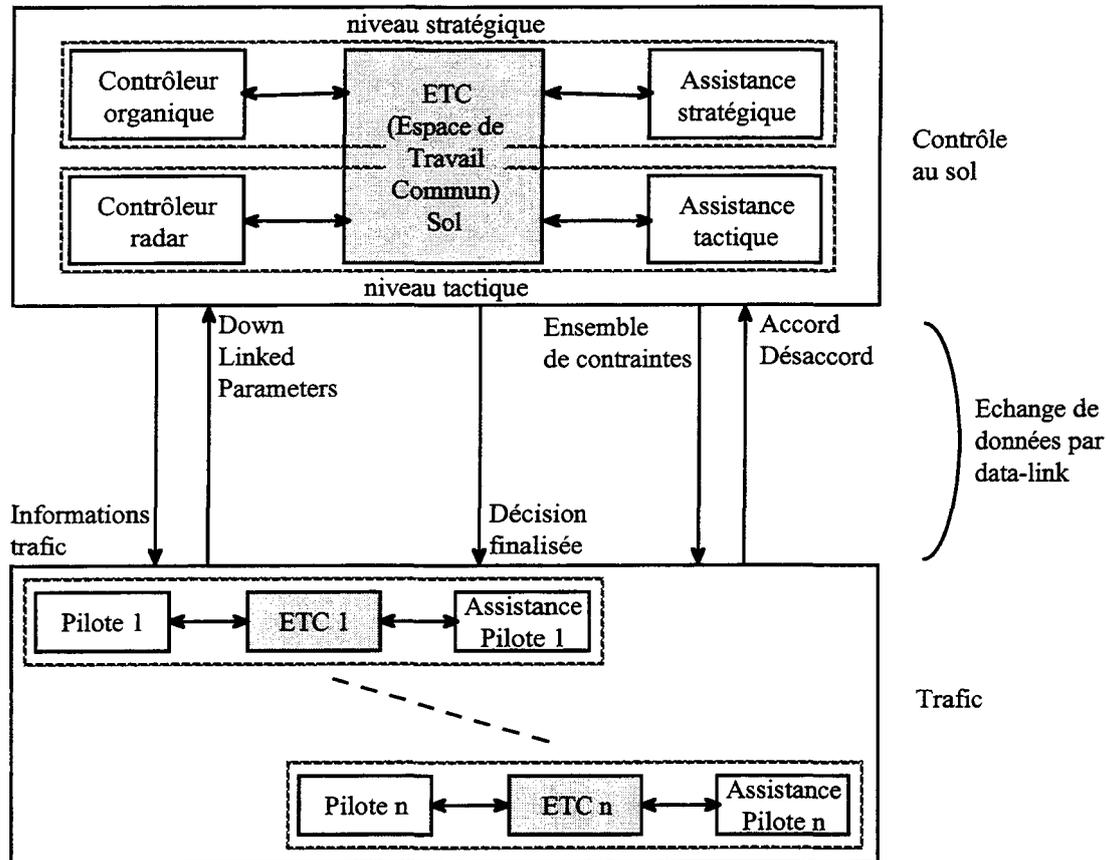


Figure V-6 : Contrôle d'un secteur sous AMANDA

4.2.3. Structure de AMANDA

La structure de AMANDA est rendue possible par l'implantation de nouvelles technologies et outils d'assistance. Les outils d'assistance, aujourd'hui disponibles, couvrent l'ensemble des étapes de l'activité cognitive de l'opérateur humain. Une comparaison des outils d'assistance de SPECTRA V1, de SPECTRA V2, et celles prévues pour AMANDA est proposée sur la figure V-7.

Cette figure s'appuie sur le modèle de Rasmussen (cf. Chapitre I) pour tenter de lister l'ensemble de ces outils d'assistance. Ils sont regroupés selon trois objectifs :

- les outils d'assistance à la validation de la représentation du trafic,
- les outils d'assistance à la validation des diagnostics,
- les outils d'assistance à la validation des décisions schématiques ou finalisées, et/ou engagées.

Ces outils d'assistance communiquent donc avec les contrôleurs au travers d'un Espace de Travail Commun, qui constitue un soutien à la coopération. De manière générale, les outils d'assistance affichent leur résultat de façon à ce qu'ils soient à la disposition des opérateurs.

Assistance à la validation de la représentation :

Dans le domaine du contrôle de trafic aérien, les outils d'assistance au maintien et à la validation de la représentation ont pour objectif de vérifier que les contrôleurs ont intégré dans la construction de leur représentation du trafic, tous les avions, ainsi que leurs paramètres.

Dans SPECTRA V2, ce type d'outil d'assistance consiste à vérifier que les contrôleurs ont répondu à l'appel d'un pilote, donc qu'ils ont correctement ajouté ce nouvel avion à leur représentation du trafic. Il vérifie également que les vols sont transférés au secteur suivant (retrait d'un avion à la représentation).

Le projet AMANDA renforce l'assistance proposée dans SPECTRA V2 puisqu'il permet de fournir aux contrôleurs davantage de précisions sur les positions des avions et leur environnement. La représentation, que les opérateurs construisent, présente donc moins d'incertitudes. Deux technologies sont mises en œuvre. La première est le CPDLC (Controler Pilot Data Link Communication). Il permet le transfert de données entre le contrôleur et le pilote. La seconde est le DAP (Downlinked Aircraft Parameters). Elle permet le transfert, vers les contrôleurs, des paramètres de l'avion et de son environnement, donc un accès à des informations plus fiables que celles du radar, et sans avoir à interroger les pilotes.

Assistance à la validation des diagnostics :

Cet outil d'assistance a pour objectif la confrontation des diagnostics élaborés par chacun des contrôleurs, mais aussi la confrontation des diagnostics dont l'un est construit par un contrôleur et l'autre par un outil d'assistance.

SPECTRA V2 intègre une aide à la détection de conflit en présentant une prédiction construite par PLAF. Les deux contrôleurs peuvent confronter leur diagnostic, et ce, au travers d'une interface graphique.

AMANDA doit, en plus, assister les contrôleurs en vérifiant que les plans de vol sont respectés, tant dans le plan vertical (niveaux de vol) que dans le plan horizontal (direction). Ce type d'assistance propose également une aide à l'anticipation basée sur l'extrapolation des trajectoires prévues des avions.

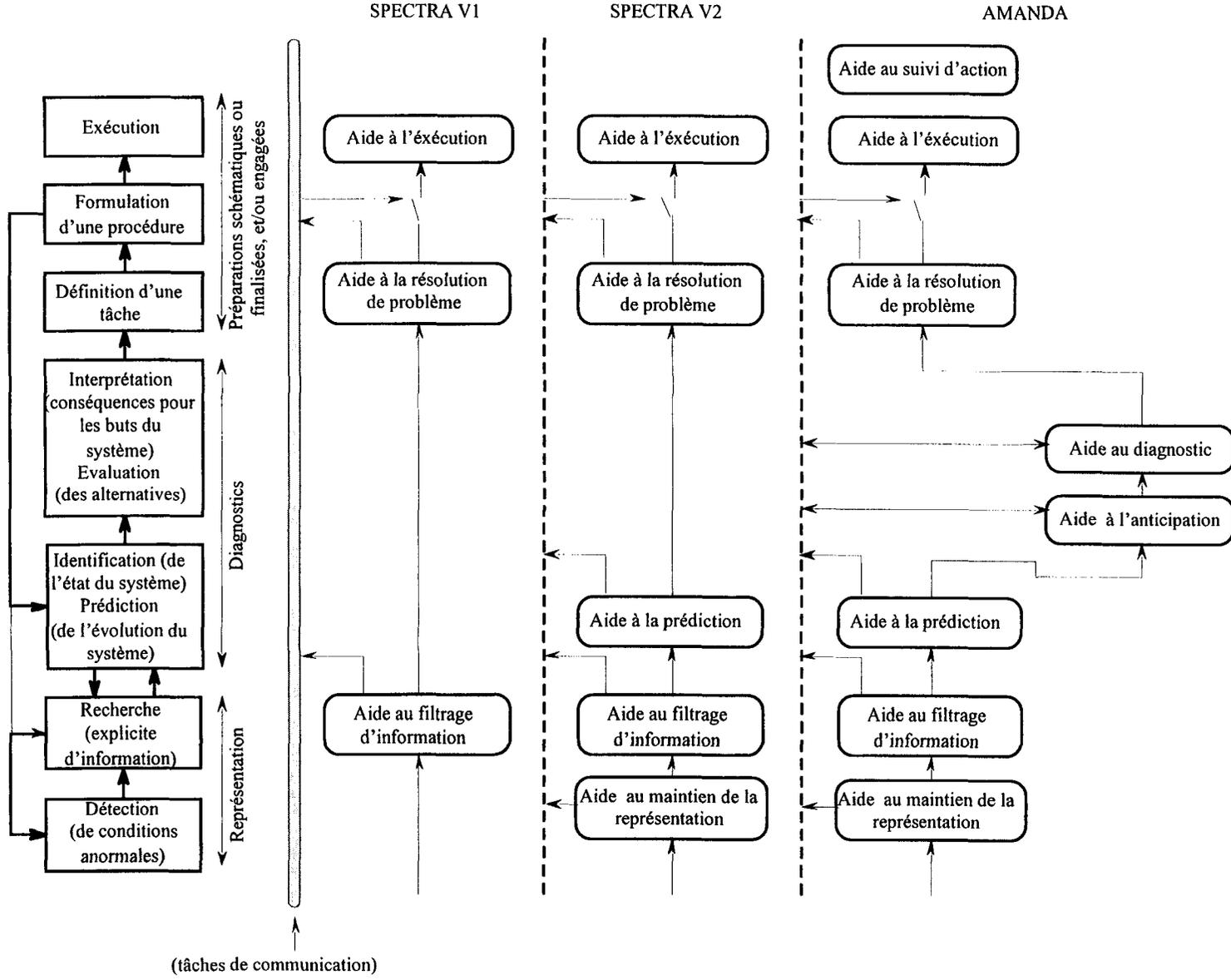
Assistance à la validation des décisions schématiques ou finalisées, et/ou engagées :

L'objectif de cet outil d'assistance est d'aider la prise de décision sur les actions à engager et de vérifier l'exécution de ces actions.

SPECTRA V1 et SPECTRA V2 comportent une aide de ce type puisque SAINTEX propose des résolutions de certains conflits et exécute ces résolutions. Cependant leurs limites portent sur le nombre restreint de résolutions que SAINTEX est capable de prendre en charge, et sur la qualité de ces résolutions. AMANDA tente de lever ces contraintes à partir des aides décrites ci-après.

Une aide à la formulation de la procédure est apportée. Elle permet la simulation interne d'une action préparée, pour vérifier si l'engagement d'une telle action permet d'atteindre l'objectif fixé. Elle peut aussi finaliser une décision schématique (une stratégie) préparée par un contrôleur. En entrant ses préparations sur une interface, le contrôleur donne à l'outil d'assistance ses intentions d'action. L'outil peut alors générer une décision finalisée, mais aussi l'évaluer en fonction des données dont il dispose sur les diagnostics et la représentation des contrôleurs.

Figure V-7 : Comparaison des outils d'assistance fournis entre les deux versions de SPECTRA et celle d'AMANDA



L'ASAS est une autre aide à la formulation de procédure. C'est un système de maintien de séparation embarqué. Cet outil d'assistance a la compétence et la capacité de décider d'une action à engager, soit pour éviter un conflit, soit pour respecter un plan de vol. Les contrôleurs, par délégation de prise de décision aux pilotes, peuvent choisir d'utiliser cette aide s'ils estiment qu'elle est plus à même de décider l'action. Elle dispose notamment d'informations court terme plus précises que celles dont disposent les contrôleurs. Les conditions de prise de décision sont proches de celles du passage à vue (cf. Chapitre II § 2.2.1).

L'aide au suivi d'action est une assistance à la validation des décisions finalisées et engagées. Elle vérifie que le contrôleur a envoyé un ordre préparé, que le pilote a effectué la manœuvre imposée par cet ordre, puis elle vérifie que l'action ordonnée répond à l'objectif du contrôleur. Le projet ERATO (Boudes, 97) propose également, avec l'outil AGENDA, une aide au suivi d'action. Cet outil donne la possibilité aux contrôleurs de positionner sur la vue radar des marqueurs géographiques. Ils sont utilisés comme support mémoire, pour prévenir les contrôleurs qu'un ordre doit être envoyé au pilote x dès que, sur la vue radar, le symbole de l'avion x passe sur ce marqueur.

Deux formes *d'aide à la planification* sont connues. Les aides à la répartition et à la planification présentées par SPECTRA V2, proposent une allocation de tâches en s'appuyant sur une prédiction de la charge de travail du contrôleur radar. L'aide à la planification proposée par ERATO consiste à afficher un ordonnancement temporel de problèmes. L'affichage ainsi obtenu définit, pour chaque contrôleur, un agenda des actions à engager (Boudes, 97). AMANDA adopte d'autres principes de répartition. L'allocateur est un contrôleur, et les tâches partageables sont celles soumises par les contrôleurs. Ces principes sont maintenant présentés.

Voici présentée l'organisation générale des échanges sol/bord. La partie suivante détaille ces échanges, mais aussi les interactions hommes-machines, et le rôle des outils d'assistance dans la construction de la décision.

4.3.Mise en œuvre du système d'aide

4.3.1. Prise de décision au sol

Les agents disponibles au sol sont les contrôleurs radar et organique, et les outils d'assistance. Les outils d'assistance ont été présentés dans le paragraphe précédent.

La répartition des tâches entre ces agents, leur organisation est dépendante de la situation du procédé. En effet, certaines typologies de situations ne peuvent être assurées que par le contrôleur radar, alors que d'autres peuvent aussi entrer dans les compétences du contrôleur organique, ou encore du système d'aide. Ces typologies de situations, dont l'analyse doit mener à l'application de manœuvre d'évitement de conflit ou de respect de plan de vol, doivent être listées. Elles feront l'objet de recherches lors de pré expérimentations. La bibliographie apporte en effet peu de réponses à ce sujet. Il est cependant possible d'imaginer trois groupes de typologies de situations, qui seraient caractérisés par le ou les types d'agents devant intervenir.

Le premier groupe est caractéristique de l'activité du contrôleur radar. Les décisions à prendre ne peuvent relever que de ce dernier. C'est la situation typique sur laquelle aucune aide, même celle du contrôleur organique ne peut agir. La prise de décision ne peut se faire qu'après un suivi de l'évolution de la situation, et donc peu de temps avant son application. La situation est caractérisée par beaucoup d'incertitude et un court délai de réflexion.

Le deuxième groupe présente des situations sur lesquelles le contrôleur organique peut prendre des décisions. Elles concernent des décisions de manœuvre en entrée et en sortie de secteur, mais aussi des préparations plus ou moins finalisées de manœuvre. Certaines situations peuvent permettre au contrôleur organique de définir entièrement la manœuvre. Dans ce cas, le contrôleur radar peut ne plus avoir à intervenir. Si la décision n'est que schématique alors, soit

le contrôleur organique, après avoir obtenu davantage de renseignements, finalise la décision, soit la finalisation est effectuée par le contrôleur radar.

Le troisième groupe réunit les deux cas présentés ci-dessus, mais la décision est, cette fois, prise par le système d'aide. Il peut s'agir d'une prise de décision complète, telle que SAINTEX dans SPECTRA V2 la construisait, ou d'une finalisation de préparation de manœuvre introduite sur la plate-forme par les contrôleurs. Cependant toute décision prise par le système d'aide doit être validée par un contrôleur avant son application. La prise de décision du système d'aide repose sur une analyse du trafic, qui passe par la construction de la représentation du trafic, et sur son diagnostic, confrontés à ceux élaborés par les contrôleurs. C'est le principe de l'Espace de Travail Commun présenté auparavant, qui facilite la mise en accord des divers agents. Dans notre cas, le système d'aide profite des éléments entrés par les contrôleurs, pour désapprouver ou valider, pour finaliser et appliquer les préparations des contrôleurs. Ces éléments sont des détections d'incidents sur le trafic, des préparations schématiques ou finalisées de décision. La compétence et le pouvoir décisionnel restent de cette façon au niveau de l'opérateur, alors garanti qu'il garde le contrôle total du trafic, et ainsi la possibilité d'assurer sa totale responsabilité.

Les différents moyens de communication qui permettent aux contrôleurs et au système d'aide de confronter leurs représentation, diagnostic et intentions sont présentés plus loin, dans le paragraphe dédié à la description des interfaces de la plate-forme.

4.3.2. *Prise de décision à bord*

La décision ne peut être prise à bord que sous respect de contraintes définies par le sol. Les contraintes sont spatiales et temporelles (cf. figure V-8). Elles concernent un avion ou un ensemble d'avions. La prise de décision doit donc être commune à ces avions. Les contraintes ont pour objectif d'isoler ces avions du reste du trafic, de façon à ce que, quelle que soit la manœuvre engagée par les avions, ceux-ci ne puissent interférer avec le trafic sous le contrôle du sol. La prise de décision à bord sous-entend une délégation de responsabilité du sol vers les pilotes.

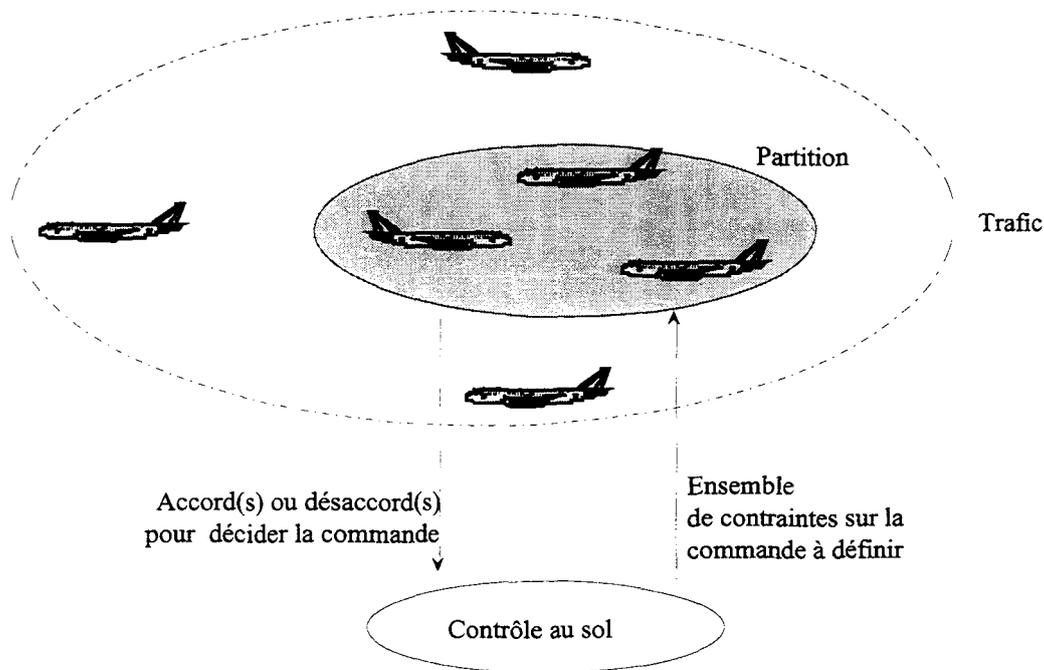


Figure V-8 : *Partitionnement du trafic et délégation*

Ce principe se rapproche de celui du projet VIZIR. Celui-ci propose un partitionnement du trafic et une résolution automatique des conflits dans certaines partitions. Cependant, ce projet, qui maintient la responsabilité des contrôleurs et impose une résolution automatique, pose le problème de la perte de maîtrise de la situation par le contrôleur. La délégation de responsabilité par AMANDA permet une réduction de la charge de travail pour les contrôleurs. De plus, il assure un maintien de la sécurité puisque, pour les partitions sélectionnées, les pilotes sont plus à même de décider les manœuvres.

La proposition de partition, et les contraintes associées, sont issues du système de contrôle sol. Les pilotes acceptent ou refusent de prendre en charge la prise de décision. La proposition apparaît sur une interface du tableau de bord des aéronefs. Ce type d'action ne peut se réaliser que lorsque des incertitudes sur le trafic sont levées, c'est-à-dire quelques minutes avant que la manœuvre ne soit appliquée. Ces conditions impliquent qu'il ne peut plus, à cette échéance, y avoir de négociation entre les contrôleurs et les pilotes.

Pour aider les pilotes à décider cette délégation, un système de maintien de séparation est mis à leur disposition. C'est le système ASAS. Chaque avion en disposerait. C'est un système automatique qui est capable, compte tenu du plan de vol de l'avion, et des contraintes extérieures, de proposer une manœuvre au pilote. La manœuvre proposée par ce système apparaît sur un écran du tableau de bord. Il est possible que la résolution d'un conflit impose que plusieurs avions effectuent une manœuvre. Les manœuvres proposées aux différents pilotes de la partition doivent donc provenir d'une prise de décision commune. Il est en effet indispensable que les actions soient coordonnées. Les différents systèmes ASAS embarqués sur chaque avion doivent, sans coordination, proposer une solution commune. De cette façon chaque pilote peut décider s'il accepte ou non la manœuvre qui lui est soumise, et qui est sous sa responsabilité. Le système ASAS a une perception de l'environnement qui est limité à 30 ou 40 Milles Nautiques. Cette distance correspond à environ 5 minutes de vol. Les pilotes doivent donc donner leur accord avant ce délai.

Les technologies actuelles ne permettent pas encore la communication entre aéronefs, il faut donc supposer que les systèmes ASAS seront conçus de façon à prendre en compte plusieurs paramètres, non seulement le plan de vol de l'avion et les contraintes extérieures, telles la météorologie, les conflits, mais aussi les contraintes que les autres avions ont à respecter. Les nouvelles technologies de communication sol/bord impliquent que chaque système ASAS dispose d'informations précises sur les autres vols. Ces données proviennent du sol, et non des autres vols directement. Il est possible de supposer que les pilotes entrèrent, par l'intermédiaire de l'écran de communication sol/bord, leur intention d'action. En plus des plans de vol de chaque avion, un système ASAS peut intégrer les préparations des autres avions. Ces préparations peuvent notamment provenir des propositions des autres systèmes ASAS, validées par les pilotes. La structure de la partition et les modes de communication nous incitent à imaginer une architecture selon laquelle chaque paire pilote/ASAS représente un agent.

En effet, nous sommes face à un domaine bien structuré, à très forte composante dynamique, qui dispose de plusieurs expertises (plusieurs pilotes, des aides à la décision et à l'action) et d'une diffusion de connaissances partagées entre les différentes entités (diffusion de données sur l'environnement et sur les autres entités par écran interposé).

4.3.3. Plate-forme expérimentale

4.3.3.1. Réalisme des expérimentations

Pour augmenter le réalisme de la plate-forme expérimentale, il faut au minimum qu'elle intègre les remarques exprimées par les contrôleurs à l'occasion des réponses aux questionnaires lors des expériences menées avec SPECTRA V2. En ce qui concerne la charge de travail, l'expérience montre que si elle est trop forte, elle ne permet pas d'évaluer correctement l'impact des outils d'assistance sur l'activité des contrôleurs. Le phénomène d'homéostasie a déjà été évoqué. Les contrôleurs, très performants, assurent de toute façon la sécurité du trafic. Ce n'est

donc pas sur ce critère que peut porter l'évaluation, ni sur la qualité de contrôle du trafic très difficile à estimer. De plus, pour les contrôleurs, les règles d'affectation des tâches à l'outil d'assistance ne dépendent pas uniquement de la charge de travail. C'est pourquoi il est préférable de maintenir une charge de travail plus forte que celle que les contrôleurs connaissent aujourd'hui de telle sorte qu'ils soient occupés en permanence, mais moins intense que pendant SPECTRA V2 où ils ont dû changer leurs modes opératoires, et délaissé la qualité du trafic.

Pour les mêmes raisons, il faut conserver une taille de secteur habituelle, respecter les routes habituelles et les vols qui empruntent ces routes, ainsi que la possibilité de faire apparaître des zones militaires. Il s'agit de s'efforcer de positionner les contrôleurs dans un contexte de travail familier afin que les aspects inattendus du trafic ne proviennent pas de faits non maîtrisés au préalable. Pour concevoir une plate-forme expérimentale réaliste, il est en effet nécessaire d'introduire des aléas (perte de contact avec un pilote, panne d'avion), mais ils doivent être contrôlés par l'expérimentateur. Ils définissent des facteurs dont il faut tenir compte à l'évaluation.

Toujours pour respecter les conditions de travail habituelles, le tableau de strips doit être commun aux deux contrôleurs. Les strips conservent les possibilités d'annotations, notamment les couleurs de porte-strip pour distinguer les flux. Les tâches de coordination inter-secteurs du contrôleur organique doivent être ajoutées, non seulement pour retrouver la charge de travail qu'il a aujourd'hui, mais aussi pour autoriser le transfert de vol anticipé. Comme autre moyen de contrôle, il faut aussi donner la possibilité au contrôleur radar de modifier les vitesses et les taux d'évolutions des avions.

La dernière indication est l'ajout de la fréquence radio au contrôleur radar. Pour intégrer ces différents échanges verbaux (avec les contrôleurs organiques des secteurs adjacents, et avec les pilotes), la plate-forme expérimentale doit comprendre un poste supplémentaire simulant ces contacts. Il consiste en une ou plusieurs personnes (d'autres contrôleurs ou des personnes formées connaissant bien leur rôle pour ne pas commettre d'erreur) qui répondent oralement aux contrôleurs, peut-être isolées de ceux-ci, et qui disposent de toutes les informations nécessaires sur une interface. Elles doivent également entrer les actions (changement de EFL pour les contrôleurs organiques des secteurs adjacents, application des ordres des contrôleurs radars pour les pilotes) par l'intermédiaire de l'interface pour modifier les plans de vol, et alimenter les données de l'outil d'assistance.

Le développement de la plate-forme demande des connaissances précises du contrôle aérien. Il implique la participation d'un contrôleur expert vérifiant la mise en place de tous ces éléments.

4.3.3.2. Interfaces

Les interfaces constituent la représentation graphique de l'Espace de Travail Commun. Il repose sur des interfaces déjà existantes (vue radar, vue strip), et peut être complété par des fenêtres de travail annexes. La base de la représentation reste les avions, plus des informations précisées par les différents agents. Les agents ont une vision plus ou moins précise de la représentation du trafic. Les principales informations fournies, soit par les agents humains, soit par les agents artificiels (les outils d'assistance), portent sur la vérification de la représentation du trafic, sur son diagnostic, et sur la vérification des intentions d'action.

Plate-forme expérimentale

Pour les raisons citées précédemment la plate-forme expérimentale se compose de quatre postes de travail. Elle nécessite en effet un poste par contrôleur, un poste pour la personne qui joue le rôle des pilotes, et un poste pour la personne qui joue le rôle des contrôleurs des secteurs adjacents (cf. figure V-9).

Poste du pseudo-pilote :

- Contrairement aux expérimentations SPECTRA, les ordres envoyés par les contrôleurs ne s'appliquent pas directement aux avions (sur le simulateur de trafic), mais, pour des raisons de réalisme citées ci-dessus, ils transitent par les pilotes des avions. C'est l'une des raisons de ce poste.

La seconde raison est la délégation possible de la prise de décision à bord des avions. Le pseudo-pilote doit donc être capable de décider la commande et de piloter l'avion. C'est notamment par cette interface qu'il est possible d'expérimenter l'assistance ASAS. Une fenêtre sur cette interface doit être capable de proposer aux pilotes impliqués dans une partition une ou des manœuvres à appliquer pour répondre au problème de la partition (éviter ou respect de plans de vol). Puisqu'il est supposé qu'il n'y ait, ni négociation entre les pilotes, ni avec les contrôleurs, un seul poste pseudo-pilote, jouant le rôle de tous les pilotes du trafic, devrait suffire.

La communication avec les contrôleurs est aussi utilisée pour que les contrôleurs envoient les contraintes spatio-temporelles dans lesquelles doit se maintenir la partition. Ces contraintes peuvent apparaître sur la fenêtre de l'outil d'assistance pour informer les pilotes. L'outil d'assistance se base sur ces données pour calculer les commandes. La proposition de commande des outils d'assistance ASAS étant affichée, les pilotes doivent, soit accepter d'appliquer cette commande, et en prendre la responsabilité, soit refuser de choisir cette proposition et/ou de prendre la responsabilité de définir la commande. Le choix des pilotes peut se faire par radio et/ou par l'intermédiaire de la fenêtre de l'assistance par data-link.

Poste du pseudo-contrôleur des secteurs adjacents :

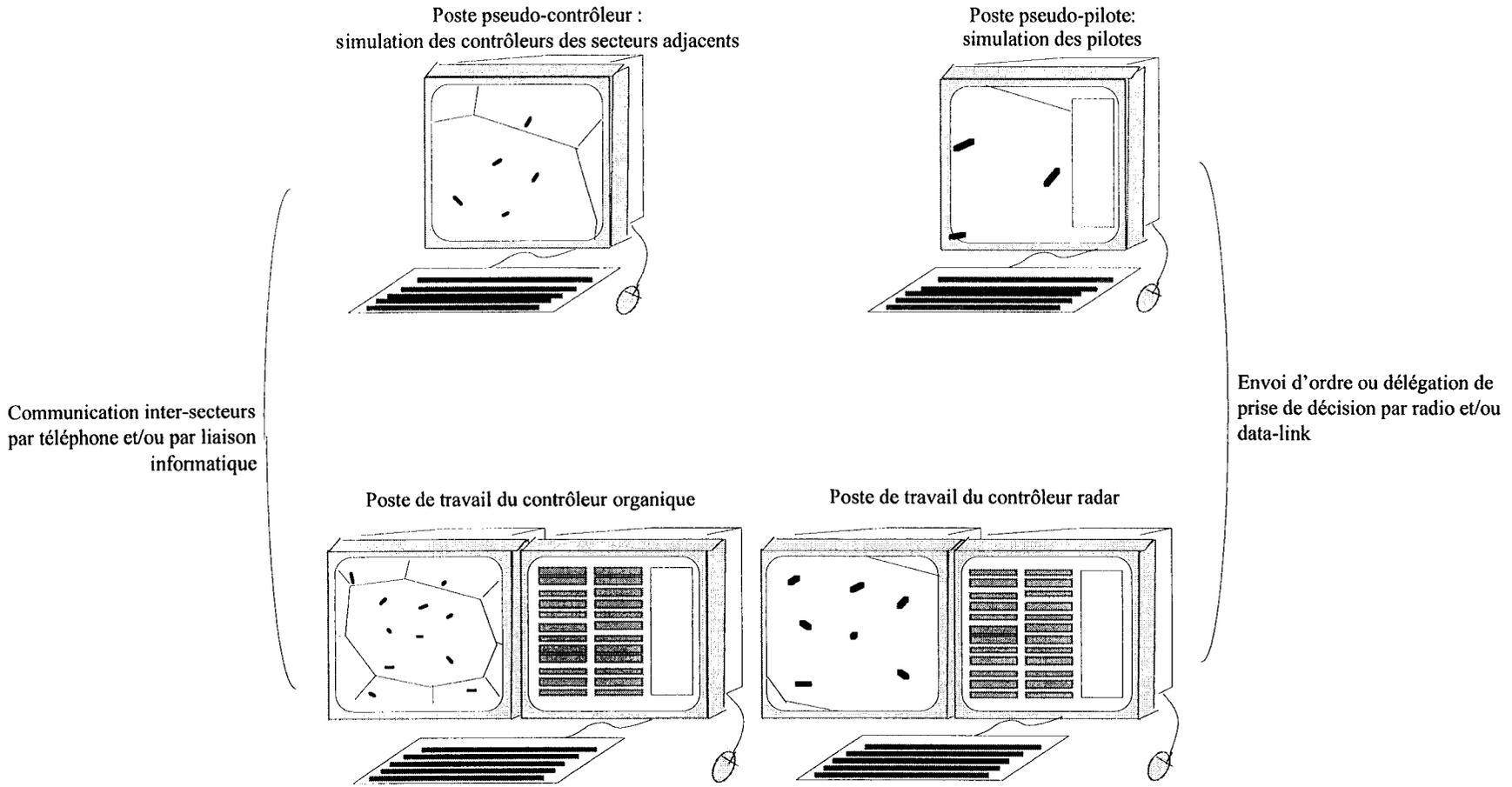
- Un secteur comporte des frontières avec plusieurs secteurs adjacents. Ce poste doit donc simuler l'ensemble de ces frontières. Il est possible de supposer, a priori, que les contrôleurs du secteur expérimenté, ne font appel qu'à un secteur adjacent à la fois. Un poste devrait donc suffire. La personne qui prend le rôle du contrôleur adjacent est, soit un contrôleur, soit un compère formé pour la circonstance. Elle doit être capable de changer la vue radar de façon à ce que l'écran affiche la partie du secteur concernée par l'appel du contrôleur. Le pseudo-contrôleur doit avoir la possibilité d'appeler un pilote pour demander le changement d'un paramètre de vol (par exemple le niveau de sortie).

Les rôles du pseudo-contrôleur et du pseudo-pilote doivent être davantage précisés. Les conseils de contrôleurs experts et l'expérience du CENA en la matière pourront amener à mieux cerner les activités, et donc à mieux définir les interfaces.

Poste de contrôle

Il se compose d'un poste de contrôle pour le contrôleur organique et d'un poste pour le contrôleur radar. Ils disposent chacun d'une vue strip et d'une vue radar. Mais contrairement à la plate-forme de SPECTRA V2, pour répondre aux demandes des contrôleurs, les tableaux de strips des contrôleurs radar et organique sont identiques. Le résultat des outils d'assistance apparaît dans une fenêtre dédiée de la vue strip.

Figure V-9 : Plate-forme expérimentale AMANDA



Les interfaces strip et radar sont similaires à celles de SPECTRA V2, mais les contrôleurs ont dans AMANDA la possibilité d'entrer leurs préparations. L'information apparaît sur l'ensemble des écrans de contrôle. Ces interfaces constituent alors une aide mémoire. C'est l'une des réponses aux problèmes de contraintes temporelles imposées par les procédés à forte composante dynamique. Les opérateurs sont rarement disponibles pour dialoguer (puisque très pris par les appels radio avec les pilotes), mais ils planifient leur activité de façon à dégager des plages temporelles moins chargées qui permettent le dialogue. Le fait de présenter des informations sur l'interface est un gain de temps pour dialoguer. Elles permettent de se faire une "idée" de ce que l'autre veut exprimer, et elles servent également de point de départ au dialogue. De telles interfaces définissent donc un soutien à la coopération homme-homme plus important que celui déjà mis en évidence lors des dernières expérimentations. En effet, la confrontation ne se fait plus uniquement sur les représentations et diagnostics, mais elle autorise aussi la confrontation des intentions d'action.

SPECTRA V2 proposait déjà un codage couleur pour distinguer les avions pris en charge par SAINTEX de ceux pris en charge par le contrôleur radar. Ici, en supplément, il faut distinguer les avions dont le contrôle est délégué aux pilotes.

Les interfaces, comme les outils d'assistance, ne sont pas encore complètement définis. La possibilité d'intégrer les pilotes dans les règles de contrôle apporte beaucoup de modifications; certaines ont été relevées, mais il en reste certainement encore insoupçonnées. En plus, de la construction des outils d'assistance et des interfaces, cette plate-forme nécessite des règles de communication très strictes. Il faut définir les priorités, et les faire respecter. SPECTRA V2 proposait un partage de tâches rigoureux entre les contrôleurs organique et radar, l'intégration des pilotes dans l'activité des contrôleurs est une étape supplémentaire qu'il ne sera pas aisé de faire accepter. Il est donc nécessaire de prendre toutes les précautions indispensables à la préparation de cette étape.

5. Conclusion

Ce cinquième chapitre avait pour objectif la mise en place d'une nouvelle forme de répartition dynamique de tâches, basée la notion d'Espace de Travail Commun, et supposant de nouveaux types d'assistance.

La première partie a exploité les résultats des expérimentations SPECTRA V2, sur la performance des contrôleurs, sur la coopération homme-machine, et sur la coopération homme-homme.

Les points forts de ces résultats ont permis dans une deuxième partie de compléter la définition de la coopération multiniveau en fonction des capacités et des compétences des agents impliqués. Après avoir mis en évidence que cette structure multiniveau peut se retrouver en Contrôle de Trafic Aérien, les supports de communication de cette structure ont été présentés. La notion d'Espace de Travail Commun a alors été introduite. C'est un sujet qui a déjà fait l'objet d'études dans plusieurs disciplines, un rappel en est fait.

L'Espace de Travail Commun est introduit dans le Contrôle de Trafic Aérien au cours d'une troisième et dernière partie, à l'occasion de la spécification du projet AMANDA. Après avoir présenté les conditions technologiques permettant la mise en place d'une telle structure de travail, tant sur les moyens de communication que sur les formes d'assistance, la plate-forme expérimentale de AMANDA a été décrite. Elle met en jeu les contrôleurs organique et radar d'un secteur, un pseudo-contrôleur jouant les contrôleurs des secteurs adjacents, et un pseudo-pilote jouant l'ensemble des pilotes du secteur. Cette nouvelle organisation, aidée de nombreux nouveaux outils d'assistance, est en cours de définition et de développement, et fera l'objet de futures expérimentations.

Conclusion

L'homme au centre de l'automatisation peut apparaître comme un paradoxe, et pourtant c'est un fait dont il faut aujourd'hui tenir compte. Cette thèse contribuera peut-être à son acceptation, en démontrant la nécessité de la pluridisciplinarité. Pour certains ce besoin paraît comme une évidence, mais ils sont peu nombreux. Ce mémoire a présenté une recherche sur la coopération homme-machine dans les procédés complexes, mais il a aussi tenté d'expliquer une coopération entre deux disciplines dont l'intersection pourrait être difficile à mettre en place, l'Automatique et la Psychologie. Cette intersection est l'homme dans son milieu. Ici l'environnement de l'homme est industriel, mais il peut s'agir de nombreux autres domaines tels le transport, la médecine ou encore l'homme chez lui ! l'objectif de la coopération interdisciplinaire est dans notre cas l'optimisation du système homme-machine, notamment la sécurité, mais ce pourrait être à des fins commerciales.

Ce mémoire expose une recherche en Automatique mais ce sont toutes les raisons exposées ci-dessus qui expliquent la part importante d'analyse de l'homme, même si l'automaticien tente de se l'approprier par son vocabulaire et ses outils. Ce fut principalement le but du premier chapitre. En s'aidant des recherches menées par différentes disciplines, il décrit les modifications de l'activité humaine qui sont dues à l'apport d'outils d'assistance dans la supervision et le contrôle de procédés. De l'analyse de ces travaux, nous avons déduit que la coopération est composée de deux principaux éléments, le savoir-faire et le savoir-coopérer, suffisamment généraux pour englober toutes les définitions et structures de coopération qui existent, mais aussi suffisamment solides pour être utilisées comme moyen pour soulever des aspects de la coopération non encore discutés. L'exemple de la répartition dynamique de tâches a notamment mis en évidence qu'un outil d'assistance dispose d'un savoir-faire qui lui permet de prendre en charge une partie des tâches de l'opérateur humain, et d'un savoir-coopérer pour qu'il puisse communiquer, négocier avec l'opérateur. Cependant, ces deux notions ne sont pas indépendantes, le savoir-faire doit répondre aux contraintes du savoir-coopérer, et vice-versa.

Le deuxième chapitre a appliqué ces notions au domaine du Contrôle de Trafic Aérien. Il a en effet retracé les recherches menées dans ce domaine pour en montrer les insuffisances. Elles provenaient du savoir-faire de l'outil d'assistance qui n'était pas assez développé, mais aussi du savoir-coopérer puisqu'il y avait peu de possibilités d'interaction entre l'homme et la machine. Ces données ont été exploitées au travers de la coopération multiniveau qui a alors été définie. La présente recherche a alors intégré en plus une interaction entre le savoir-coopérer et le savoir-faire de deux agents à des niveaux d'abstraction différents.

C'est au cours du troisième chapitre qu'ont été appliqués et évalués ces principes. Ce chapitre a présenté la plate-forme expérimentale et les possibilités qu'elle offre à l'opérateur humain en terme de supervision et contrôle de trafic aérien, mais aussi en terme de coopération avec les outils d'assistance. Des protocoles expérimentaux rigoureux ont conduit à des résultats enrichissants issus de données objectives et subjectives sur les outils d'assistance et sur la structure coopérative mise en place. Cependant, peu d'informations sur les mécanismes coopératifs sont apparus. C'est pourquoi des analyses supplémentaires ont été effectuées, au moyen d'une nouvelle méthode d'évaluation.

Cette méthode d'évaluation fait l'objet du quatrième chapitre. Elle est décrite dans son principe et expliquée dans son application au Contrôle de Trafic Aérien. Elle apporte des résultats sur l'activité cognitive de l'opérateur humain et révèle des mécanismes de coopération encore cachés. Ces résultats prouvent la validité de notre hypothèse à savoir faire piloter le répartiteur de tâches par l'outil d'assistance d'un niveau fonctionnel stratégiquement supérieur. Mais cette façon d'organiser l'activité impose de donner plus de facilités de coopération entre les agents de niveaux d'abstraction différents, qu'ils soient humains ou artificiels.

A cet effet, l'une des solutions proposées est l'Espace de Travail Commun. Il est présenté dans le cinquième chapitre. Il apporte un soutien physique à l'activité coopérative. Une solution est explicitée dans le cadre du Contrôle de Trafic Aérien, mais elle pourra prendre aussi consistance dans un autre domaine d'application, les avions de chasse. C'est un domaine de haute technologie toujours en renouvellement, sur lequel des outils d'assistance disposent d'un savoir-faire très vaste, ce qui permet *d'imaginer* la coopération sous toutes ses facettes, et donc le savoir-coopérer en adéquation.

Au delà des expérimentations menées sur site industriel, ce mémoire aura permis de mettre en évidence les manques quant à la définition de la coopération. Nous avons donc tenté depuis le premier chapitre de compléter les définitions existantes, notamment par la distinction du savoir-faire et du savoir-coopérer. Le savoir-faire repose sur l'activité individuelle d'un agent, le savoir-coopérer est nécessaire dès qu'un besoin d'informations détenus par un autre agent est ressenti. Le savoir-coopérer est défini autour de la fonction de la coopération, du contrôle de la coopération, et des moyens donnés à la coopération. Ses valeurs d'entrée ou de sortie sont respectivement issues du savoir-faire d'un autre agent ou dirigées vers le savoir-faire d'un autre agent.

A partir de ces notions de savoir-faire et de savoir-coopérer, nous avons tenté de redécrire les formes coopératives proposées par Schmidt, intégrative, confrontative et augmentative. Notre progression sur la définition de la coopération nous permettra d'approfondir la description de ces formes et d'essayer de démontrer qu'elles sont génériques en ce sens qu'elles constituent une base pour modéliser toute coopération Homme-Machine.

Bibliographie

AMALBERTI R., 1991, Savoir-faire de l'opérateur : aspects théoriques et pratiques en ergonomie, In Amalberti, De Montmollin, Theureau, Modèles en analyse du travail, Collection Psychologie et Sciences Humaines, Mardaga (p26)

AMALBERTI R., 1996, La conduite de systèmes à risques, Paris : Presses universitaires de France (p29)

BENTLEY R., RODDEN T., SAWYER P., SOMMERVILLE I., 1992, An architecture for tailoring cooperative multi-user displays, Proceedings of CSCW'92, November 92 (p129)

BERGER P., 1995, Quelle Europe pour le contrôle aérien?, Le monde informatique, 9 Juin 1995 (p35)

BILLINGS C., 1991, Human-centered aircraft automation : a concept and guidelines, NASA Technical Memorandum 103885 (p22,p28)

BISSERET A., 1995, Représentation et décision experte: Psychologie cognitive de la décision chez les aiguilleurs du ciel, Collection Travail, Octares Editions (p22,p37,p41,p131)

BORNE P., DAUPHIN-TANGUY G., RICHARD J.P., ROTELLA F., ZAMBETTAKIS I., 1993, Analyse et régulation des processus industriels, Tome 1, Régulation continue, Collection Méthodes et pratiques de l'ingénieur, TechNip (p13)

BOUDES N., 1997, L'anticipation dans le Contrôle des Environnements Dynamiques. Le cas du Contrôle de Trafic Aérien, Thèse de Doctorat Nouveau Régime en Ergonomie, Université Toulouse-Le-Mirail, Juin (p138)

BOUDES N., CELLIER J.M., 1996, Functional biases in anticipation : the case of air traffic control., Proceedings of the First International Conference on Applied Ergonomics, ICAE'96, Istanbul, Turkey, May 21-24, p882-885 (p124)

BOY G., 1995, Coopération Homme-Machine dans les systèmes complexes : Agents et Aide à la décision, Proceedings of IHM'95, Ingénierie des Interfaces Homme-Machine (p26)

BRESSOLLE M.C., PAVARD B., 1996, Design of cooperative user interfaces through the analysis of mutual belief genesis, Proceedings of the First International Conference on Applied Ergonomics, ICAE'96, Istanbul, Turkey, May 21-24, pp.890-893 (p129)

CHATTY S., 1996, Le mikado des aiguilleurs du ciel : comment toucher aux outils du trafic aérien sans prendre de risque?, La Recherche, N°285, Mars 1996 (p131)

CHATTY S., LECOANET P., 1996, Un poste de travail avec reconnaissance de gestes pour le contrôle aérien, Proceedings of IHM'95, Ingénierie des Interfaces Homme-Machine (p131)

CHOLLET M.G., 1993, Hegias X-Windows : Partage dynamique de tâches dans un environnement multi-média., Rapport CENA R93-041, 30 Novembre (p124)

CHOLLET M.G., DE BELER N., SALVI R., 1992, Une méthode de conception orientée utilisateurs pour mener un projet de grande envergure, PHIDIAS: des résultats significatifs, Proceedings de ERGO.IA'92 (p44)

CLARKE A., 1996, A theoretical model of cooperation, Proceedings of the Second International Workshop on the Design of Cooperative Systems, COOP'96, Antibes-Juan-les-Pins, June 12-14, pp.57-81 (p25,p29)

CREVITS I., 1996, Répartition dynamique de tâches dans les procédés complexes. Modélisation de la répartition anticipée : application au contrôle de trafic aérien, Thèse de Doctorat spécialité Automatique des systèmes industriels et humains, Université de Valenciennes, France, 28 Janvier (p8,p34,p53,p55,p59)

CREVITS I., LEMOINE M.-P., DEBERNARD S., HOC J.M., BES M.O., MILLOT P., 1995, Etude d'un système de partage dynamique de tâches entre contrôleurs du trafic aérien et système automatisé; Premiers résultats des expérimentations sur SPECTRA V2, Rapport final de la convention LAIH/CENA 91/C0008 (p52,p85)

CUNY X., 1979, Different levels of analysing process control tasks, Ergonomics, Vol. 22, pp. 415-425 (p88)

DEBERNARD S., 1993, Contribution à la répartition dynamique de tâches entre opérateur et système automatisé : application au contrôle de trafic aérien, Thèse de Doctorat spécialité Automatique Industrielle et Humaine, Université de Valenciennes, France, 28 Janvier (p8,p32-33,p43,p45,p51)

DEBERNARD S., CREVITS I., LEMOINE M.-P., HOC J.-M., MILLOT P., 1997, Notes intermédiaires du projet AMANDA, Rapport intermédiaire de la convention LAIH/CENA (p132)

DEBERNARD S., VANDERHAEGEN F., DEBBACHE N., MILLOT P., 1990, Dynamic task allocation between controller and AI systems in air-traffic control., 9th European annual conference on Human Decision Making and Manual Control, Ispra, Italy (p45)

DECORTIS F., PAVARD B., 1994, Communication et coopération : de la théorie des actes de langage à l'approche ethnométhodologique, In Pavard B. (Ed.), Systèmes coopératifs de la modélisation à la conception. Toulouse Octarés (p129)

DELSART F., 1995, Diagnostic collectif dans la conduite de processus industriel : coopération et ergonomie des systèmes Homme-Homme et Homme-Machine, Thèse de Doctorat, UFR de Psychologie, Université de Paris 8, France, 14 Décembre (p15,p22,p33)

DILLENBOURG P., BAKER M., 1996, Negotiation spaces in human-computer collaborative learning, Proceedings of the Second International Workshop on the Design of Cooperative Systems, COOP'96, Antibes-Juan-les-Pins, June 12-14, pp.187-203 (p27)

DUBOIS D., GENTIL S., 1994, Intelligence artificielle et Automatique, Revue d'Intelligence Artificielle, Vol.8, n°1, pp.7-27 (p11)

FALZON P., 1994, Les communications dans le travail: modèles et méthodes, dialogues fonctionnels et activité collective, Le travail humain, tome 57, n°4, pp.299-312 (p90)

FALZON P., 1996, L'explication au travail, Explication'96, Sophia Antipolis,19-21 Juin, pp.3-13 (p130)

FININ T., KLEIN D., 1987, On the requirement of active expert systems, 7ème journée internationales les Systèmes experts et leurs applications, Avignon, France (p23,p30)

FOX M.S., 1981, An organizational view of distributed systems, IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, vol. SMC-11, n°1, Jan. 1981, pp.70-79 (p48)

GAILLARD I., MARAIS F., LEROUX M., 1995, Conception d'aides au travail : le cas du contrôle aérien, Proceedings of IHM'95, Ingénierie des Interfaces Homme-Machine (p28)

GANDIBLEUX X., 1993, Système d'aide à la décision pour la conduite de processus perturbés; une approche hybride fondée sur l'intelligence artificielle, la programmation linéaire et l'aide multicritère à la décision. Application à la mobilisation de réserve tertiaire d'Electricité De France, Thèse de Doctorat spécialité Automatique Industrielle et Humaine, Université de Valenciennes, France, 18 Juin (p30)

GAWRON V.J., 1989, A taxonomie of independant variables affecting human performance, *International journal of man-machine studies*, n°31, pp.643-672 (p25)

HART S.G., STAVELAND L.E., 1988, Development of NASA-TLX (task load index) : results of empirical and theoretical research., In : P.A. Hancock and N. Meshkati (Eds). *Human mental workload*. North-Holland, *Advances in psychology*, pp139-184 (p85)

HAYES-ROTH B., 1995, An architecture for adaptative intelligent systems, *Artificial Intelligence*, n°72, pp.329-365 (p28)

HOC J.M., 1987, *Psychologie cognitive de la planification*, P.U.G, Grenoble, Collection Sciences & Technologie de la connaissance (p13,p16-17,p53-54)

HOC J.M., 1995, La résolution de problèmes en situation dynamique: apport de la psychologie cognitive et implications sur la conception de la coopération homme-machine, *Supervision et coopération homme-machine*, Tome 1, Journées d'Etude S3 : Sûreté, Surveillance, Supervision, Paris, France, 12-13 Janvier (p25)

HOC J.M., 1996, *Supervision et contrôle de processus: la cognition en situation dynamique*, P.U.G, Grenoble, Collection Sciences & Technologie de la connaissance (p13,p16,p18,p24,p26,p54)

HOC J.M., AMALBERTI R., 1995, Diagnostic : some theoretical questions raised by applied research, *Current psychology of cognition*, 14, pp.73-100 (p16,p95)

HOC J.M., LEMOINE M.P., 1997, Cognitive evaluation of human-human and human-machine cooperation modes in Air Traffic Control, *The International Journal of Aviation Psychology*, Vol.8, N°1, pp.1-32 (p27-28)

JONES P., JASEK C., 1997, Intelligent Support for Activity Management (ISAM) : An architecture to Support Distributed Supervisory Control., *IEEE Systems, Man and Cybernetics, Part A : Systems and Humans*, Vol. 27, N°3, May (p129)

KARSENTY L., BREZILLON P., 1995, *Coopération Homme-Machine et explication*, *Le travail humain*, tome 58, n°4, pp.289-310 (p29)

LANDAU I.D., 1986, *La commande adaptative : un tour guidé*, *Commande adaptative : aspects pratiques et théoriques*. Landau, Dugard. Ed. Masson. pp 1-82. Paris (p17)

LE ROBERT, 1992, *Le Robert Dictionnaire d'aujourd'hui*, Edition Club France Loisir, Paris (p26)

LE STRUGEON E., 1995, *Une méthodologie d'auto-adaptation d'un système multi-agents cognitifs*, Thèse de Doctorat spécialité Automatique industrielle et humaine, Université de Valenciennes, France, 17 Janvier (p47)

LEE J., MORAY N., 1992, Trust, control strategies and allocation of function on human-machine systems, *Ergonomics*, vol. 35, n°10, pp.1243-1270 (p53)

LEMOINE M.P., CREVITS I., DEBERNARD S., MILLOT P., 1995 (1), Men-machines cooperation : toward an experiment of a multi-level cooperative organization in air traffic control, *International Workshop on the Design of Cooperative Systems*, Antibes-Juan-les-Pins, January 25-27, pp.405-423 (p49)

LEMOINE M.-P., DEBERNARD S., CREVITS I., MILLOT P., 1994, Etude d'un système de partage dynamique de tâches entre contrôleurs du trafic aérien et système automatisé; *Bilan des expérimentation SWIFT 3 et recommandations pour SPECTRA V2*, Premier rapport intermédiaire de contrat. Convention LAIH/CENA 91/C0008 (p69)

LEMOINE M.P., DEBERNARD S., CREVITS I., MILLOT P., 1996, Cooperation between humans and machines : first results of an experimentation of a multi-level cooperative organisation in air traffic control, *Cooperative Supported Cooperative Work: The journal of Collaborative Computing*, Vol. 5, N°2-3, pp.299-321, December (p62)

LEMOINE M.P., DEBERNARD S., MILLOT P., 1995 (2), Men-machines cooperation : toward an experimentation of a multi-level cooperative organization in air traffic control, IEA World Conference, Rio de Janeiro, Brazil, October 16-20, pp.367-370 (p124)

MASSON M., 1995, Prévention automatique des erreurs de routine, Thèse de doctorat, Université de Liège, Belgique (p22,p27)

MILLOT P., 1988, Supervision des procédés automatisés et ergonomie, Paris: Hermes, Collection Traitement des nouvelles technologies. Série Automatique (p8,p13,p24,p29,p32,p51)

MILLOT P., HOC J.M., 1997, Human-Machine Cooperation : metaphor or possible reality ?, Proceedings of ECCS'97, Manchester, 9-11 April (p25)

MILLOT P., LEMOINE M.-P., 1998, An attempt for Generic Concepts Toward Human-Machine Cooperation, IEEE International Conference on System, Man, and Cybernetics, San Diego, California, USA, October 11-14 (p129)

MINTZBERG H., 1986, Structure et dynamique des organisations, Les éditions d'organisation (Paris) et les éditions Agence d'ARC Inc. (Montréal) (p47)

MORDCHELLES P., ANGEBAULT H., ANGERAND L., 1989, Système expert pour le contrôle automatique de nuit, Rapport de stage de fin d'études. Rapport CENA/N89129/Juin (p44)

MUIR B.M., 1987, Trust between humans and machines, and the design of decision aids, International Journal of Man-Machine Studies, N°27, pp.527-539 (p29)

OLDER M. T., WATERSON P. E., CLEGG C. W., 1997, A critical assessment of task allocation methods and thiers applicability, Ergonomics, Vol. 40, N°2, pp151-171 (p34)

PAVARD B., 1994, Systèmes coopératifs: de la modélisation à la conception, Toulouse. Octarès (p27)

PIAGET J., 1965, Etudes sociologiques, Genève : Droz (p27)

RASMUSSEN J., 1983, Skills, rules and knowledge; signals, signs, and symbols, and other distinctions in human performance models, IEEE Transactions on systems, man and cybernetics, SMC13, n°3, May-June (p19)

REASON J., 1993, L'erreur humaine (J.M. Hoc Trad.), Paris : Presse Universitaire de France (p19)

RIEGER C.A., GREENSTEIN J., 1982, The allocation of tasks between the human and computer in automated systems., Proceedings of the IEEE on International Conference on "Cybernetics and Society", pp204-208, New-York, USA (p31)

ROGALSKI J., 1994, Formation aux activités collectives, Le travail humain, tome 57, n°4, pp.367-386 (p25,p26)

ROTH E.M., BENNETT K.B., WOODS D.D., 1988, Human interaction with an "intelligent" machine, In Hollnagel E., Mancini G., Woods D.D. (Eds), Cognitive engineering in complex dynamic worlds, pp. 23-69. London : Academic Press (p120)

ROYER V., 1994, Partage de croyances : condition nécessaire pour un système coopératif ?, In Pavard B. (Ed.), Systèmes coopératifs de la modélisation à la conception, pp.253-270. Toulouse Octarès (p129)

SADT, 1989, Un langage pour communiquer, IGL Technology, Edition EYROLLES (p97)

SALEMBIER, 1994, Assistance coopérative aux activités complexes : l'exemple du contrôle de trafic aérien., In Pavard B. (Ed.), Systèmes coopératifs de la modélisation à la conception (p253-270). Toulouse Octarès (p44)

SAMURCAY R., ROGALSKI J., 1993, Cooperative work and decision-making in emergency management, Le travail humain, tome 56, pp.53-77 (p23,p34)

SANDERSON P., SCOTT J., JOHNSON T., MAINZER J., WATANABE L. , JAMES J., 1994, MacSHAPA and the enterprise of exploratory sequential data analysis (ESDA), *International Journal of Human-Computer Studies*, 41, pp.633-681 (p99)

SCHMIDT K., 1994, Cooperative work and its articulation : requirements for computer support, *Le travail humain*, tome 57, n°4, pp.345-366 (p25-26)

SHERIDAN T.B., 1984, Supervisory control of remote manipulators, vehicules and dynamic processes : experiment in command and display aiding, *Advances in Man-Machine Systems Research*, Vol.1 (p12)

SHERIDAN T.B., 1992, Telerobotics, automation and human supervisory control., The MIT Press (p21)

TABORIN V., 1989, Coopération entre opérateur et système d'aide à la décision pour la conduite de procédés continus : application à l'interface opérateur système expert du projet Alliance, Thèse de Doctorat, Université de Valenciennes, France (p21)

TROGNON A., 1988, Comment représenter l'interaction ?, Edition du CNRS, "Echanges sur la conversation" (p90)

VANDERHAEGEN F., 1993, Coopération homme-machine multiniveau entre une équipe d'opérateurs humains et des outils d'assistance : application au contrôle de trafic aérien, Thèse de Doctorat spécialité Automatique Industrielle et Humaine, Université de Valenciennes, France, 21 Décembre (p8,p18,p43,p53)

ZOROLA-VILLARREAL R., 1995, L'évaluation des IHMs Multi-utilisateurs pour le Travail Coopératif., Thèse de Doctorat spécialité Informatique, Université de Toulouse I, France, 10 Octobre (p129)

Liste des tableaux et figures

Chapitre I

Figure I-1:	Les degrés d'automatisation dans les systèmes de contrôle et de supervision, adaptée de (Sheridan, 84)	p.12
Figure I-2:	Représentation d'état et dimensions cognitives	p.14
Figure I-3:	Modèle de résolution de problème en situation dynamique (Hoc & Amalberti, 95)	p.16
Figure I-4:	Échelle double de Rasmussen révisée, adaptée de (Hoc, 96)	p.18
Figure I-5:	Modèle des comportements de l'opérateur humain, (Rasmussen, 83)	p.19
Figure I-6:	Formes coopératives et savoir-faire	p.26
Figure I-7:	Structure verticale	p.30
Figure I-8:	Mode explicite	p.31
Figure I-9:	Mode implicite	p.32
Tableau I-1:	Assistance aux tâches de supervision, (Sheridan, 92)	p.21
Tableau I-2:	Catégories d'outils d'assistance (Finin & Klein, 87)	p.23

Chapitre II

Figure II-1:	Organisation de l'espace aérien français	p.36
Figure II-2:	Découpe horizontale de l'espace aérien	p.37
Figure II-3:	Une position de contrôle	p.37
Figure II-4:	Un strip	p.38
Figure II-5:	Moyens techniques d'une position de contrôle	p.39
Figure II-6:	SPECTRA V1	p.43
Figure II-7:	Structures d'organisations disposées selon leur degré de complexité/incertitude (Le Strugeon, 95)	p.48
Figure II-8:	Répartition dynamique de tâches multiniveau	p.49
Figure II-9:	Répartition dynamique de tâches interne	p.49
Figure II-10:	Répartition dynamique de tâches externe	p.50
Figure II-11:	Possibilités de transfert	p.51
Figure II-12:	Formalisation d'une tâche	p.54
Figure II-13:	Problèmes soulevés par la répartition dynamique de tâches anticipée (Crévits, 96)	p.55
Figure II-14:	Tâches en recouvrement	p.55
Figure II-15:	Assistance au contrôle de trafic aérien	p.57
Figure II-16:	Résolution par SAINTEX	p.58
Tableau II-1:	Niveaux de gestion du trafic aérien par le système CAUTRA (Crévits, 96)	p.38

Chapitre III

Figure III-1: Interfaces expérimentales	p.62
Figure III-2: Vue radar	p.63
Figure III-3: Étiquette et plot représentatifs de l'avion	p.64
Figure III-4: Ordres en cap	p.64
Figure III-5: Utilisation des routes graphiques	p.65
Figure III-6: Vue strip	p.66
Figure III-7: Strip	p.67
Figure III-8: Interface PLAF	p.70
Figure III-9: Architecture de SPECTRA V2	p.72
Figure III-10: Situation sans aide	p.74
Figure III-11: Situation explicite	p.74
Figure III-12: Situation explicite assisté	p.75
Figure III-13: Flux du secteur	p.78
Figure III-14: Relation entre la consommation de carburant et la situation expérimentale	p.80
Figure III-15: Relation entre le temps de transit et la situation expérimentale	p.81
Figure III-16: Charge de travail du contrôleur radar estimée par les contrôleurs radar (CR) et organique (CO)	p.84
Figure III-17: Distinction de quatre zones de charge différentes, sur l'échelle subjectives de 0 à 7	p.83
Tableau III-1: Plan d'expérience	p.76
Tableau III-2: Nombre d'erreurs en fonction des conditions expérimentales	p.81
Histogramme III-1: Différences entre scénarios	p.77
Histogramme III-2: Les commandes et leurs objectifs	p.82

Chapitre IV

Figure IV-1: Représentation d'une conversation	p.90
Figure IV-2: Régulation des représentations	p.91
Figure IV-3: Classes d'activité	p.92
Figure IV-4: SADT sur la coopération	p.97
Figure IV-5: Fenêtre MacSHAPA utilisée	p.100
Figure IV-6: Présentation des résultats suivant les prédicats	p.105
Figure IV-7: Résultats sur les objets des prises d'information	p.106
Figure IV-8: Résultats sur les types d'information recueillies	p.107
Figure IV-9: Résultats sur les conditions de prise d'information.	p.107
Figure IV-10: Résultats sur les types d'intervention	p.108
Figure IV-11: Résultats sur les conditions d'intervention	p.109
Figure IV-12: Résultats sur les types de coopération homme-homme	p.111
Figure IV-13: Résultats sur les buts de la coopération homme-homme	p.111
Figure IV-14: Résultats sur les contrôles de la coopération homme-homme	p.111
Figure IV-15: Résultats sur les activités sous-jacentes de la coopération homme-homme	p.112
Figure IV-16: Résultats sur la coopération homme-machine	p.113
Figure IV-17: Résultats sur les buts de la coopération homme-machine	p.113
Figure IV-18: Résultats sur les contrôles de la coopération homme-machine	p.114
Figure IV-19: Résultats sur les activités sous-jacentes à la coopération homme-machine	p.115

Tableau IV-1: Les formes coopératives de Schmidt et SPECTRA V2	p.96
Tableau IV-2: Attitudes inversées des contrôleurs sur les buts de la coopération homme-machine	p.113
Tableau IV-3: Attitudes inversées des contrôleurs sur les contrôles de la coopération homme-machine	p.114
Tableau IV-4: Principaux résultats sur les activités cognitives par situation expérimentale	p.117

Chapitre V

Figure V-1: Axes de coopération	p.125
Figure V-2: Réponse à un sous-objectif de la régulation du procédé	p.125
Figure V-3: Niveaux de gestion du trafic aérien	p.126
Figure V-4: Structure de communication à partir d'un espace de travail commun	p.128
Figure V-5: Évolution de l'état de l'affinement des décisions au cours du temps et intégration des fonctionnalités de l'outil d'assistance dans les étapes décisionnelles des contrôleurs	p.133
Figure V-6: Contrôle d'un secteur sous AMANDA	p.135
Figure V-7: Comparaison des outils d'assistance fournis entre les deux versions de SPECTRA et celle d'AMANDA	p.137
Figure V-8: Partitionnement du trafic et délégation	p.139
Figure V-9: Plate-forme expérimentale AMANDA	p.143

Annexe 1 - Questionnaires

Situation sans aide : Contrôleur organique

- **Questionnaire sur les erreurs et les risques**

a1 : “Comment pouvez-vous qualifier la façon dont vous avez géré le trafic par rapport aux diverses façons de procéder que vous êtes amené à adopter dans votre travail habituel ? En particulier, avez-vous dû profondément modifier votre façon de faire ?”

a2 : “Avez-vous été contraint de prendre des risques que vous ne seriez pas amené à prendre d'habitude ?”

a3 : “La situation à laquelle vous venez d'être confronté est inhabituelle. Par conséquent, il ne serait pas étonnant que vous ayez été conduit à des erreurs que vous ne commettez pas d'habitude. Est-ce le cas ? En d'autres termes, si c'était à refaire, vous y prendriez-vous de la même façon ? Merci de me préciser, de mémoire, les moments où vous estimez avoir commis une erreur.”

a4 : “Êtes-vous satisfait de votre performance globale ?”

- **Questionnaire sur la charge de travail**

b1-co : “Au cours du scénario, nous vous avons demandé régulièrement d'évaluer la charge de travail de votre collègue. Ces évaluations vous ont-elles gêné dans votre travail ?”

b2-co : “Considérez-vous que vos évaluations étaient représentatives des niveaux de charge effectifs à ces moments-là ?”

b3-co : “Quels sont les facteurs, dans la situation que vous venez de traiter, qui déterminaient vos évaluations ? Merci de me les citer du plus important au moins important ?”

- **Questionnaire sur la répartition des conflits**

c1-sa-co : “Quand vous avez fait des choses pour faciliter la tâche de votre collègue, comment cela s'est passé pour vous et pour lui ?”

c2-sa-co : “Dans quelles conditions avez-vous fourni cette aide ? Quel type d'aide avez-vous fourni ?”

- **Questionnaire sur la qualité de la situation et des interfaces classiques (radar & strip)**

d1-sa&sp : “Que pensez-vous du réalisme du scénario ?”

d2-sa&sp : “Que pensez-vous de l'interface-radar ?”

d3-sa&sp : “Que pensez-vous de l'interface-strip ?”

d4-sa&sp : “Est-ce que ces interfaces vous ont permis de réaliser correctement votre travail ?”

d5-sa&sp : “Pour travailler, comment avez-vous globalement réparti votre attention entre ces deux interfaces ?”

Situation sans aide : Contrôleur radar

- **Questionnaire sur les erreurs et les risques**

a1 : “Comment pouvez-vous qualifier la façon dont vous avez géré le trafic par rapport aux diverses façons de procéder que vous êtes amené à adopter dans votre travail habituel ? En particulier, avez-vous dû profondément modifier votre façon de faire ?”

a2 : “Avez-vous été contraint de prendre des risques que vous ne seriez pas amené à prendre d'habitude ?”

a3 : “La situation à laquelle vous venez d'être confronté est inhabituelle. Par conséquent, il ne serait pas étonnant que vous ayez été conduit à des erreurs que vous ne commettez pas d'habitude. Est-ce le cas ? En d'autres termes, si c'était à refaire, vous y prendriez-vous de la même façon ? Merci de me préciser, de mémoire, les moments où vous estimez avoir commis une erreur.”

a4 : “Êtes-vous satisfait de votre performance globale ?”

- **Questionnaire sur la charge de travail**

b1-cr : “Au cours du scénario, nous vous avons demandé régulièrement d'évaluer votre charge de travail. Ces évaluations vous ont-elles gêné dans votre travail ?”

b2-cr : “Considérez-vous que vos évaluations étaient représentatives des niveaux de charge effectifs à ces moments-là ?”

b3-cr : “Quels sont les facteurs, dans la situation que vous venez de traiter, qui déterminaient vos évaluations ? Merci de me les citer du plus important au moins important ?”

- **Questionnaire sur la répartition des conflits**

c1-sa-cr : “Quand votre collègue a voulu faire des choses pour vous faciliter la tâche, comment cela s'est passé pour vous ?”

c2-sa-cr : “Dans quelles conditions cela vous a-t-il aidé ou gêné ? Quel type d'aide vous a-t-il apporté ?”

- **Questionnaire sur la qualité de la situation et des interfaces classiques (radar & strip)**

d1-sa&sp : “Que pensez-vous du réalisme du scénario ?”

d2-sa&sp : “Que pensez-vous de l'interface-radar ?”

d3-sa&sp : “Que pensez-vous de l'interface-strip ?”

d4-sa&sp : “Est-ce que ces interfaces vous ont permis de réaliser correctement votre travail ?”

d5-sa&sp : “Pour travailler, comment avez-vous globalement réparti votre attention entre ces deux interfaces ?”

Situation explicite : Contrôleur organique

- **Questionnaire sur les erreurs et les risques**

a1 : “Comment pouvez-vous qualifier la façon dont vous avez géré le trafic par rapport aux diverses façons de procéder que vous êtes amené à adopter dans votre travail habituel ? En particulier, avez-vous dû profondément modifier votre façon de faire ?”

a2 : “Avez-vous été contraint de prendre des risques que vous ne seriez pas amené à prendre d'habitude ?”

a3 : “La situation à laquelle vous venez d'être confronté est inhabituelle. Par conséquent, il ne serait pas étonnant que vous ayez été conduit à des erreurs que vous ne commettez pas d'habitude. Est-ce le cas ? En d'autres termes, si c'était à refaire, vous y prendriez-vous de la même façon ? Merci de me préciser, de mémoire, les moments où vous estimez avoir commis une erreur.”

a4 : “Êtes-vous satisfait de votre performance globale ?”

- **Questionnaire sur la charge de travail**

b1-co : “Au cours du scénario, nous vous avons demandé régulièrement d'évaluer la charge de travail de votre collègue. Ces évaluations vous ont-elles gêné dans votre travail ?”

b2-co : “Considérez-vous que vos évaluations étaient représentatives des niveaux de charge effectifs à ces moments-là ?”

b3-co : “Quels sont les facteurs, dans la situation que vous venez de traiter, qui déterminaient vos évaluations ? Merci de me les citer du plus important au moins important ?”

- **Questionnaire sur la répartition des conflits**

c1-sp-co : “Comment avez-vous ressenti cette tâche de répartition des conflits ?”

c2-sp-co : “Sur quels critères vous êtes-vous appuyé pour prendre vos décisions de répartition ?”

- **Questionnaire sur la qualité de la situation et des interfaces classiques (radar & strip)**

d1-sa&sp : “Que pensez-vous du réalisme du scénario ?”

d2-sa&sp : “Que pensez-vous de l'interface-radar ?”

d3-sa&sp : “Que pensez-vous de l'interface-strip ?”

d4-sa&sp : “Est-ce que ces interfaces vous ont permis de réaliser correctement votre travail ?”

d5-sa&sp : “Pour travailler, comment avez-vous globalement réparti votre attention entre ces deux interfaces ?”

- **Questionnaire sur l'assistance à la résolution de conflit**

e1-co : “Comment trouvez-vous les résolutions proposées par SAINTEX ?”

e2-co : “SAINTEX vous a-t'il gêné dans l'organisation globale de votre travail ?”

e3-co : “Les conflits que SAINTEX est capable de prendre en charge sont-ils significatifs des situations de contrôle ?”

e4-co : “Les conflits pris en charge par SAINTEX étaient-ils compréhensibles (type de conflit et résolution) ?”

e5-co : “Ce type d'assistance vous semble-t'il pertinent ?”

e6-co : “Quelles qualités doit posséder un outil d'aide ? (robustesse, prédictibilité, complétude des compétences,...)”

Situation explicite : Contrôleur radar

• Questionnaire sur les erreurs et les risques

a1 : “Comment pouvez-vous qualifier la façon dont vous avez géré le trafic par rapport aux diverses façons de procéder que vous êtes amené à adopter dans votre travail habituel ? En particulier, avez-vous dû profondément modifier votre façon de faire ?”

a2 : “Avez-vous été contraint de prendre des risques que vous ne seriez pas amené à prendre d'habitude ?”

a3 : “La situation à laquelle vous venez d'être confronté est inhabituelle. Par conséquent, il ne serait pas étonnant que vous ayez été conduit à des erreurs que vous ne commettez pas d'habitude. Est-ce le cas ? En d'autres termes, si c'était à refaire, vous y prendriez-vous de la même façon ? Merci de me préciser, de mémoire, les moments où vous estimez avoir commis une erreur.”

a4 : “Êtes-vous satisfait de votre performance globale ?”

• Questionnaire sur la charge de travail

b1-cr : “Au cours du scénario, nous vous avons demandé régulièrement d'évaluer votre charge de travail. Ces évaluations vous ont-elles gêné dans votre travail ?”

b2-cr : “Considérez-vous que vos évaluations étaient représentatives des niveaux de charge effectifs à ces moments-là ?”

b3-cr : “Quels sont les facteurs, dans la situation que vous venez de traiter, qui déterminaient vos évaluations ? Merci de me les citer du plus important au moins important ?”

• Questionnaire sur la répartition des conflits

c1-sp-cr : “Ce mode de répartition des conflits vous gêne-t-il ?”

c2-sp-cr : “Ce mode de répartition vous semble-t-il efficace ? Apporte-t-il une aide réelle ? Diminue-t-il réellement votre charge de travail ?”

c3-sp-cr : “Avez-vous surveillé les conflits alloués à SAINTEX ?”

c4-sp-cr : “Sur quels critères vous êtes-vous appuyé pour reprendre les conflits affectés à SAINTEX, si cela vous est arrivé, ou pour lui en affecter ?”

• Questionnaire sur la qualité de la situation et des interfaces classiques (radar & strip)

d1-sa&sp : “Que pensez-vous du réalisme du scénario ?”

d2-sa&sp : “Que pensez-vous de l'interface-radar ?”

d3-sa&sp : “Que pensez-vous de l'interface-strip ?”

d4-sa&sp : “Est-ce que ces interfaces vous ont permis de réaliser correctement votre travail ?”

d5-sa&sp : “Pour travailler, comment avez-vous globalement réparti votre attention entre ces deux interfaces ?”

- **Questionnaire sur l’assistance à la résolution de conflit**

e1-cr : “Comment trouvez-vous les résolutions proposées par SAINTEX ?”

e2-cr : “SAINTEX vous a-t’il gêné dans la résolution des conflits à votre charge ?”

e3-cr : “SAINTEX vous a-t’il gêné dans l’organisation globale de votre travail ?”

e4-cr : “Vous semble-t’il envisageable de travailler avec des conflits affectés à SAINTEX en interaction avec les conflits à votre charge ?”

e5-cr : “Les conflits que SAINTEX est capable de prendre en charge sont-ils significatifs des situations de contrôle ?”

e6-cr : “Les conflits pris en charge par SAINTEX étaient-ils compréhensibles (type de conflit et résolution) ?”

e7-cr : “Ce type d’assistance vous convient-il ?”

e8-cr : “Ce type d’assistance vous semble-t’il pertinent ?”

e9-cr : “Quel autre type d’assistance souhaiteriez-vous utiliser ?”

e10-cr : “Quelles qualités doit posséder un outil d’aide ? (robustesse, prédictibilité, complétude des compétences,...)”

Situation explicite assistée : Contrôleur organique

- **Questionnaire sur les erreurs et les risques**

a1 : “Comment pouvez-vous qualifier la façon dont vous avez géré le trafic par rapport aux diverses façons de procéder que vous êtes amené à adopter dans votre travail habituel ? En particulier, avez-vous dû profondément modifier votre façon de faire ?”

a2 : “Avez-vous été contraint de prendre des risques que vous ne seriez pas amené à prendre d'habitude ?”

a3 : “La situation à laquelle vous venez d'être confronté est inhabituelle. Par conséquent, il ne serait pas étonnant que vous ayez été conduit à des erreurs que vous ne commettez pas d'habitude. Est-ce le cas ? En d'autres termes, si c'était à refaire, vous y prendriez-vous de la même façon ? Merci de me préciser, de mémoire, les moments où vous estimez avoir commis une erreur.”

a4 : “Êtes-vous satisfait de votre performance globale ?”

- **Questionnaire sur la charge de travail**

b1-co : “Au cours du scénario, nous vous avons demandé régulièrement d'évaluer la charge de travail de votre collègue. Ces évaluations vous ont-elles gêné dans votre travail ?”

b2-co : “Considérez-vous que vos évaluations étaient représentatives des niveaux de charge effectifs à ces moments-là ?”

b3-co : “Quels sont les facteurs, dans la situation que vous venez de traiter, qui déterminaient vos évaluations ? Merci de me les citer du plus important au moins important ?”

- **Questionnaire sur la répartition des conflits**

c1-ap-co : “Comment avez-vous ressenti cette tâche de supervision de la répartition des conflits ?”

c2-ap-co : “Sur quels critères vous êtes-vous appuyé pour reprendre les conflits affectés à SAINTEX, si cela vous est arrivé, ou pour lui en affecter ?”

- **Questionnaire sur la qualité de la situation et des interfaces classiques (radar & strip)**

d1-ap-co : “Que pensez-vous du réalisme du scénario ?”

d2-ap-co : “Que pensez-vous de l'interface-radar ?”

d3-ap-co : “Que pensez-vous de l'interface-strip ?”

d4-ap-co : “Que pensez-vous globalement des interfaces ?”

- **Questionnaire sur l'assistance à la résolution de conflit**

e1-co : "Comment trouvez-vous les résolutions proposées par SAINTEX ?"

e2-co : "SAINTEX vous a-t'il gêné dans l'organisation globale de votre travail ?"

e3-co : "Les conflits que SAINTEX est capable de prendre en charge sont-ils significatifs des situations de contrôle ?"

e4-co : "Les conflits pris en charge par SAINTEX étaient-ils compréhensibles (type de conflit et résolution) ?"

e5-co : "Ce type d'assistance vous semble-t'il pertinent ?"

e6-co : "Quelles qualités doit posséder un outil d'aide ? (robustesse, prédictibilité, complétude des compétences,...)"

- **Questionnaire sur l'interface de PLAF**

f1-co : "Cette interface vous a-t'elle permis d'appréhender correctement les situations à venir ?"

f2-co : "Cette interface vous a-t'elle permis de mieux organiser votre travail ?"

f3-co : "Les surcharges indiquées par l'interface étaient-elles en adéquations avec votre propre évaluation de la situation ?"

f4-co : "Attendiez-vous des surcharges là où le système n'en indiquait pas ?"

f5-co : " Quel autre mode de représentation vous aiderez ?"

f6-co : "Une assistance à l'évaluation de la charge du contrôleur radar vous semble-t'elle pertinente ?"

f7-co : "Pour travailler, comment avez-vous globalement réparti votre attention entre les trois interfaces ?"

Situation explicite assistée : Contrôleur radar

- **Questionnaire sur les erreurs et les risques**

a1 : “Comment pouvez-vous qualifier la façon dont vous avez géré le trafic par rapport aux diverses façons de procéder que vous êtes amené à adopter dans votre travail habituel ? En particulier, avez-vous dû profondément modifier votre façon de faire ?”

a2 : “Avez-vous été contraint de prendre des risques que vous ne seriez pas amené à prendre d'habitude ?”

a3 : “La situation à laquelle vous venez d'être confronté est inhabituelle. Par conséquent, il ne serait pas étonnant que vous ayez été conduit à des erreurs que vous ne commettez pas d'habitude. Est-ce le cas ? En d'autres termes, si c'était à refaire, vous y prendriez-vous de la même façon ? Merci de me préciser, de mémoire, les moments où vous estimez avoir commis une erreur.”

a4 : “Êtes-vous satisfait de votre performance globale ?”

- **Questionnaire sur la charge de travail**

b1-cr : “Au cours du scénario, nous vous avons demandé régulièrement d'évaluer votre charge de travail. Ces évaluations vous ont-elles gêné dans votre travail ?”

b2-cr : “Considérez-vous que vos évaluations étaient représentatives des niveaux de charge effectifs à ces moments-là ?”

b3-cr : “Quels sont les facteurs, dans la situation que vous venez de traiter, qui déterminaient vos évaluations ? Merci de me les citer du plus important au moins important ?”

- **Questionnaire sur la répartition des conflits**

c1-ap-cr : “Ce mode de répartition des conflits vous gêne-t-il ?”

c2-ap-cr : “Ce mode de répartition vous semble-t-il efficace ? Apporte-t-il une aide réelle ? Diminue-t-il réellement votre charge de travail ?”

c3-ap-cr : “Avez-vous surveillé les conflits alloués à SAINTEX ?”

- **Questionnaire sur la qualité de la situation et des interfaces classiques (radar & strip)**

d1-ap-cr : “Que pensez-vous du réalisme du scénario ?”

d2-ap-cr : “Que pensez-vous de l'interface-radar ?”

d3-ap-cr : “Que pensez-vous de l'interface-strip ?”

d4-ap-cr : “Est-ce que ces interfaces vous ont permis de réaliser correctement votre travail ?”

- **Questionnaire sur l'assistance à la résolution de conflit**

e1-cr : "Comment trouvez-vous les résolutions proposées par SAINTEX ?"

e2-cr : "SAINTEX vous a-t'il gêné dans la résolution des conflits à votre charge ?"

e3-cr : "SAINTEX vous a-t'il gêné dans l'organisation globale de votre travail ?"

e4-cr : "Vous semble-t'il envisageable de travailler avec des conflits affectés à SAINTEX en interaction avec les conflits à votre charge ?"

e5-cr : "Les conflits que SAINTEX est capable de prendre en charge sont-ils significatifs des situations de contrôle ?"

e6-cr : "Les conflits pris en charge par SAINTEX étaient-ils compréhensibles (type de conflit et résolution) ?"

e7-cr : "Ce type d'assistance vous convient-il ?"

e8-cr : "Ce type d'assistance vous semble-t'il pertinent ?"

e9-cr : "Quel autre type d'assistance souhaiteriez-vous utiliser ?"

e10-cr : "Quelles qualités doit posséder un outil d'aide ? (robustesse, prédictibilité, complétude des compétences,...)"

- **Questionnaire sur l'interface de PLAF**

f1-cr : "Cette interface vous a-t'elle permis d'appréhender correctement les situations à venir ?"

f2-cr : "Cette interface vous a-t'elle permis de mieux organiser votre travail ?"

f3-cr : "Les surcharges indiquées sur l'interface sont-elles représentatives de situations normales, chargées ou surchargées ?"

f4-cr : "Attendez-vous des surcharges là où le système n'en indiquait pas ?"

f5-cr : " Quel autre mode de représentation vous aiderez ?"

f6-cr : "Pour travailler, comment avez-vous globalement réparti votre attention entre les trois interfaces ?"

Annexe 2 - TLX (TASK LOAD INDEX)

Méthode à suivre

- Questionnaire à effectuer après chaque expérimentation **et** après le scénario d'apprentissage. Ne pas oublier de donner les références de l'expérimentation.
- Sur l'échelle d'estimation, le sujet exprime son sentiment pour chacun des cinq descripteurs, et ce en positionnant une croix sur une ligne horizontale pour chacun d'entre eux, (voir exemple).
- Sur le tableau des paires de descripteur, le sujet choisi pour chaque paire, le descripteur qui a induit le plus sa charge de travail et le coche. Si le sujet hésite, il peut cocher dans la case "ou" (voir exemple).

Explication des descripteurs sémantiques

Exigence mentale

Dans ce descripteur, l'opérateur doit évaluer le niveau d'exigence des activités de perception et de cognition, c'est-à-dire quantifier les difficultés dues au travail de recherche de l'information, de traitement de cette information et de prise de décision.

Exigence physique

Dans ce descripteur, l'opérateur doit évaluer le niveau des exigences physiques, c'est-à-dire évaluer le nombre des activités physiques réalisées et quantifier le niveau des difficultés musculaires.

Exigence temporelle

Dans ce descripteur, l'opérateur doit évaluer la "pression temporelle", c'est-à-dire si le temps disponible pour exécuter les tâches est suffisant, si l'enchaînement des tâches est rapide, ou si des temps "morts" existent durant l'expérimentation.

Performance

Vis-à-vis des objectifs à atteindre, l'opérateur doit évaluer qualitativement sa performance et rendre compte ainsi de sa "satisfaction" vis-à-vis des résultats qu'il a obtenus.

Stress

L'opérateur exprime la manière dont il a ressenti l'expérimentation, c'est-à-dire qu'il exprime ses sentiments d'insécurité, de découragement, de contrainte psychologique et son état de "tension".

Résumé : La Coopération est un point de rencontre de nombreuses disciplines. L'Automatique décrit la Coopération Homme-Machine au travers des outils d'assistance qu'elle est capable de développer. Les Sciences Humaines l'étudient au travers du comportement en milieu collectif. Cette thèse s'inscrit dans ce courant pluridisciplinaire et propose des critères et des moyens pour concevoir des systèmes d'aide qui répondent aux exigences tant humaines qu'industrielles. La Répartition Dynamique de Tâches entre un opérateur humain et un système d'aide, est une forme de coopération qui permet de couvrir une vaste plage de l'activité de supervision et de contrôle de procédés complexes. Ce mémoire en donne un exemple puisque la recherche s'applique au Contrôle de Trafic Aérien.

Compte tenu du foisonnement de définitions de la coopération, notre recherche tente de recentrer les points de vue éparses et propose une synthèse en fonction des notions de savoir-faire et de savoir-coopérer. La description des agents coopératifs en fonction de ces notions facilite la recherche des lacunes dans l'organisation des agents, ainsi que dans les tâches qui leur sont affectées. Une méthodologie d'évaluation est notamment présentée. Elle s'appuie sur un modèle cognitif de l'opérateur humain, et des critères de performance pondérés par des critères sur la qualité de la coopération. L'une des solutions proposées à l'issue des expérimentations est la conception d'un Espace de Travail Commun. En plus d'une interface homme-machine, il est muni de modules intelligents qui facilitent ou automatisent l'identification des plans des agents coopératifs. Le système d'aide dispose alors de données précises et objectives pour piloter le répartiteur et l'allocateur de tâches. Un exemple d'Espace de Travail Commun est présenté, il répond à l'augmentation du trafic aérien en apportant un soutien actif à la coopération entre les contrôleurs aériens, les pilotes, et les systèmes d'aide.

Title : Human-machines cooperation in complex processes : technical and cognitive models for the Air Traffic Control.

Abstract : The cooperation is a meeting point for many disciplines. The Automation describes the human-machine cooperation with assistance tools it is able to build. The Social and Life Sciences study the cooperation through the human behaviour in a group. This thesis comes within this pluridisciplinary scope and proposes criteria and means to build assistance tools which meet of human and industrial requirements. The Dynamic Task Allocation between a human operator and an assistance tool is one form of cooperation which allows to access to a large range of the activity of supervision and control of complex processes. This thesis gives an example of this activity because the research is applied to the Air Traffic Control.

Considering the abundance of definitions for the cooperation, our research tries to focus all the points of view and to summarise them according to the notions of the know-how and the know how to cooperate. The description of the cooperative agents with these notions make easier the search of failures in the agents organisation, and in the tasks they have to perform. An evaluation methodology is described. It uses a cognitive model of the human operator, and performance criteria counterbalanced by criteria about the quality of the cooperation. One solution proposed at the end of experiments is the design of a Common Work Space. Besides a human-machine interface, it is provided with intelligent modules which make easier or automate the identification of the plans of the cooperative agents. So the assistance tools have precise and objective data to pilot the task allocator. A Common Work Space example is presented, it meets of the air traffic increase by providing an active support to the cooperation between air traffic controllers, pilots and assistance tools.

Discipline : Automatique Industrielle et Humaine

Mots clés : procédés industriels complexes, supervision, coopération homme-machine, répartition dynamique de tâches, méthode d'évaluation, contrôle de trafic aérien.

Université de Valenciennes et du Hainaut-Cambrésis - LAMIH
Le Mont Houy

3 27 14 11 83

Bibliothèque Universitaire de Valenciennes



00904845